

Teatro Regional del Biobío  
Rovir, Melharro y Cortiño  
2018



Revista  
Hábitat  
Sustentable

ISSN 0719-0700

Vol. 15 N°. 1

junio

2025

UNIVERSIDAD DEL BIOBIO 2025



Objeto singular Concepción



UNIVERSIDAD DEL BIO BIO





**Revista  
Hábitat  
Sustentable**

ISSN 0719-0700

Vol. 15 N°. 1

junio

2025



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**

**RECTOR:**

BENITO UMAÑA HERMOSILLA

**DECANO FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO:**

ROBERTO EDUARDO BURDILES ALLENDE

**EDITORIA RESPONSABLE:**

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

Rafael Eduardo López Guerrero / Departamento Ciencias de la Construcción, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile  
rlopez@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 ALMENDRA ÁLVAREZ RÍOS / Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile  
calvarezr@ubiobio.cl

**CORRECCIÓN DE ESTILO:**

TANIA VIDAL RAMOS

**GESTIÓN INFORMÁTICA:**

KARINA LEIVA / Universidad del Bío-Bío, Chile

**DIRECTOR DE ARTE Y DIAGRAMACIÓN:**

IGNACIO A. SÁEZ ARANEDA

**CONSEJO EDITORIAL:**

Dra. M<sup>o</sup> 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 Objeto singular Coliumo, 2022

**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, JornalTOcs 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**  
Jocelyn Vidal-Ramos, Rafael Eduardo López-Guerrero, Maureen Trebilcock-Kelly
- 10 **DRIVING THE DEVELOPMENT OF ENERGY COMMUNITIES IN COLOMBIA: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR A DECENTRALIZED ENERGY TRANSITION**  
María Fernanda Medina-Reyes, Juan Gabriel Fajardo-Cuadro, Juan Carlos Martínez-Santos
- 20 **IMPACT OF NEIGHBORHOOD MORPHOLOGY IN TROPICAL CLIMATES: A CASE STUDY OF THE TRADITIONAL NEIGHBORHOODS OF KANYAKUMARI, INDIA**  
Monika Shankar, Meenatchi Sundaram
- 32 **ASSESSING OUTDOOR THERMAL COMFORT IN HIGH-DENSITY URBAN KAMPUNGS IN TAMANSARI, BUNDUNG: A MICROCLIMATE SIMULATION STUDY**  
Reinaldi Primanizar, Suhendri Suhendri, Dibya Kusyala
- 44 **ESTRATEGIAS DE REHABILITACIÓN DE APLICACIÓN GENERALIZADA EN MUROS DE CAPS EN TUCUMÁN, ARGENTINA**  
Amalita Fernández, Beatriz Silvia Garzón
- 54 **PROTECCIÓN SOLAR EN EDIFICACIONES MEDITERRÁNEAS, MADRID, ESPAÑA: DISEÑO CON ALGORITMOS E INTELIGENCIA ARTIFICIAL**  
Marcelo Alejandro Fraile-Narváez
- 68 **ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN VIVIENDAS FAMILIARES: ESTUDIO BIBLIOMÉTRICO DE TEMAS EXPLORADOS, TENDENCIAS Y RETOS**  
Amelia Eunice Maldonado-Lozano, Jhonny Gárate-Ríos, Magda Ushiñahua-Ushiñahua, Gladis Maribel Heredia-Baca, Gabriela del Pilar Palomino-Alvarado, Luis Paredes-Aguilar
- 84 **INTERVENCIONES ECOLÓGICAS PARA MEJORAR EL CONFORT TÉRMICO EN UN PATIO ESCOLAR EN AREQUIPA, PERÚ**  
Katherin Geraldine Vilcanqui-Coaquira, Patricia Carolina Delgado-Meneses, Valkiria Raquel Ibárcena-Ibárcena
- 98 **ANÁLISIS DEL CONFORT TÉRMICO DE VIVIENDAS CON DIFERENTES SISTEMAS CONSTRUCTIVOS UBICADAS SOBRE 3000 M.S.N.M. EN LA ZONA RURAL ANDINA DE ECUADOR**  
Andrea Nataly Moreno-Albuja, Vanessa Guillén-Mena, Nathalie Madeleine Santamaría-Herrera
- 116 **REVITALIZACIÓN DEL BAHAREQUE ANCESTRAL DEL PUEBLO KICHWA SARAGURO, ECUADOR: CONSERVACIÓN, ADAPTACIÓN Y DIFUSIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUCTIVO**  
Flor Lozano-Guamán, Andrea Jaramillo-Benavides, Kuty Lozano-Guamán
- 134 **EXPLORING MICROALGAE APPLICATIONS IN BUILDING FACADES: A BIBLIOMETRIC PERSPECTIVE**  
Aslı Taş, Güneş Mutlu-Avinç

## EDITORIAL

### El contexto actual de la publicación científica

Cuando se habla de productividad académica, se hace referencia a la generación e implementación de conocimiento que aporta de manera significativa al desarrollo de una disciplina. Como indican Gordillo-Salazar et al. (2020), esta productividad puede manifestarse en diversos productos académicos, como publicaciones científicas, patentes, entre otros.

Según el *Ranking Nature Research Leaders 2024* elaborado por *Nature Index* (2024), que clasifica a los países con los mejores desempeños en investigación, Chile ocupa el puesto número 33 a nivel mundial y el segundo lugar en América Latina, registrando un alza del 4,7%. Solo es superado por Brasil, que se encuentra en el puesto 24, aunque con un descenso del 12,4%. Iberti (2024), en el diario *La Tercera*, sostiene que este crecimiento en la productividad académica chilena responde tanto a un mayor acceso a fondos concursables nacionales e internacionales como a un fortalecimiento del trabajo colaborativo entre instituciones académicas. Un ejemplo de ello es la Universidad del Bío-Bío, que entre 2019 y 2023 ha alcanzado 2.324 publicaciones, reflejando un crecimiento sostenido gracias a colaboraciones estratégicas, desarrollo tecnológico y políticas de financiamiento en investigación que han robustecido sus capacidades científicas.

Como todo proceso de expansión, tanto en contextos nacionales como internacionales, este crecimiento trae consigo beneficios y desafíos. El ámbito de la investigación no es la excepción. En esta línea, Bajpai (2015) relata que fue Beall quien, en 2010, acuñó por primera vez el término "*predatory publishers*", es decir, editoriales o revistas científicas "depredadoras". Tal como lo describe Beall (2012), este concepto se refiere a publicaciones que imitan el nombre, diseño y formato de revistas de acceso abierto consolidadas y reconocidas en sus respectivos campos, pero que no poseen relación con ellas. Estas prácticas buscan engañar a investigadores incautos para que publiquen en plataformas carentes de rigurosidad en la revisión por pares, sin estándares científicos reconocibles y, además, con altos costos de publicación ocultos. Es importante subrayar que la existencia de estas revistas no solo es atribuible a quienes las promueven, sino también a investigadores que, por diferentes razones, acceden a estos atajos poco éticos para incrementar artificialmente su productividad académica.

### Revistas depredadoras: una amenaza a la ciencia

Entre las características más comunes que permiten identificar a las revistas depredadoras —según lo señalado por Richtig et al. (2018) y Abad-García

(2019)— se encuentran: procesos de evaluación nulos o insuficientes que resultan en publicaciones extremadamente rápidas; uso de títulos similares a los de revistas legítimas y prestigiosas; inclusión de consejos editoriales falsos sin el consentimiento de las personas referenciadas; uso de métricas e índices de impacto inexistentes o falsificados; información de contacto inválida que imposibilita una comunicación efectiva con los editores; temáticas excesivamente amplias y dispersas; vulneración de principios éticos en la publicación e investigación científica; afirmaciones engañosas sobre su indexación en bases reconocidas como *Web of Science*, *Scopus* o *PubMed*; artículos publicados con errores ortográficos, tipográficos o enlaces rotos; y el uso de correos electrónicos para la recepción de manuscritos en lugar de plataformas editoriales profesionales.

### El valor de la publicación científica diamante

El acceso abierto, como modelo de difusión del conocimiento, tuvo un hito fundacional en la *Conferencia de Budapest* en 2001, aunque adquirió mayor notoriedad con la *Conferencia de Berlín* y la *Declaración de Bethesda* en 2003 (Zedda, 2025; Klebel et al., 2025). A partir de entonces, se impulsó la idea de que las investigaciones financiadas con fondos públicos deberían estar disponibles para toda la sociedad, reduciendo barreras económicas, legales y tecnológicas para su consulta.

Según Klebel et al. (2025), se reconocen cinco tipos principales de acceso abierto:

- Gold Open Access (OA): acceso inmediato y gratuito al contenido, con costos de publicación generalmente cubiertos por los autores o sus instituciones.
- Green OA: autoarchivo de una versión del artículo en repositorios abiertos, usualmente tras un periodo de embargo.
- Hybrid OA: revistas por suscripción que ofrecen acceso abierto opcional a ciertos artículos mediante pagos adicionales.
- Bronze OA: acceso gratuito otorgado por la editorial, sin licencias abiertas explícitas.
- Diamond OA: acceso libre e inmediato tanto para lectores como para autores, financiado por instituciones académicas, consorcios u otras entidades sin fines de lucro.

En el informe de la *Segunda Conferencia de Acceso Abierto Diamante*, realizada en México en 2023,

Saenen et al. (2024) describen este modelo como una forma de comunicación académica que garantiza que los resultados de la investigación estén disponibles de manera inmediata y sin restricciones, a través de licencias abiertas y sin costos asociados. Este enfoque equitativo no solo democratiza el acceso al conocimiento, sino que también promueve la participación activa de todas y todos los involucrados en su creación, difusión, reutilización y preservación. Además, se centra en asegurar la calidad de los contenidos y en garantizar el derecho de todos los ciudadanos a beneficiarse de los avances científicos y sus aplicaciones.

### El rol de Hábitat Sustentable en este ecosistema

En este escenario de transformación vertiginosa de la comunicación científica, la revista *Hábitat Sustentable* reafirma su compromiso con una ciencia abierta, ética, rigurosa y socialmente relevante. Nuestra línea editorial no solo adhiere a los principios del acceso abierto diamante, sino que también se proyecta como un espacio de publicación para investigaciones que aborden la sustentabilidad desde perspectivas críticas e interdisciplinarias, especialmente desde y para el Sur Global.

Publicamos sin cobrar a autores ni lectores, con procesos rigurosos de revisión por pares, en tres idiomas, y con una política editorial orientada a fortalecer comunidades académicas emergentes. Frente a las amenazas que representan las revistas depredadoras y la creciente mercantilización del conocimiento, *HS* se posiciona como una plataforma segura, ética y profesional. Esto lo hace no solo para investigadores consolidados, sino también para autoras y autores noveles que buscan publicar bajo altos estándares de calidad.

Asimismo, *HS* busca promover un pensamiento científico comprometido con los desafíos sociales y ambientales de nuestros territorios. La sustentabilidad, entendida de manera integral —ambiental, social, económica y cultural—, requiere enfoques abiertos, colaborativos y transdisciplinarios. En ese sentido, valoramos especialmente aquellas contribuciones que promueven nuevas formas de comprender la relación entre hábitat, tecnología y sociedad.

Invitamos a nuestras lectoras y lectores, así como a académicos, profesionales y estudiantes, a ser parte activa de este proyecto editorial. Ya sea como autoras, revisores o lectores críticos, su participación es esencial para construir colectivamente una ciencia más abierta, confiable y pertinente.

### Referencias Bibliográficas

- Abad-García, M. F. (2019). El plagio y las revistas depredadoras como amenaza a la integridad científica. *Anales de pediatría*, 90(1), 57.e1-57-e8. <https://doi.org/10.1016/j.anpedi.2018.11.003>
- Gordillo-Salazar, J. M., Sánchez-Torres, Y., Terrones-Cordero, A., y Cruz-Cruz, M. (2020). La productividad académica en las instituciones de educación superior en México: de la teoría a la práctica. *Propósitos y Representaciones*, 8(3), e441. <https://doi.org/10.20511/pyr2020.v8n3.441>
- Bajpai, M. (2015). Publicaciones: Publicaciones depredadoras. *British Dent Journal* 219, 147 <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2015.643>
- Beall, J. (2012). Las editoriales depredadoras corrompen el acceso abierto. *Nature* 489, 179. <https://doi.org/10.1038/489179a>
- Iberti, C. (9 de diciembre de 2024). *Investigación académica: ¿Cuánto publican las universidades chilenas?* Diario LT La Tercera. <https://www.latercera.com/educacion/noticia/investigacion-academica-cuanto-publican-las-universidades-chilenas/EM6WTHFVOZFSTBHNJJFXONRGJU/#:~:text=En%20el%20periodo%202019%2D2023,18.482%20y%2016.831%20publicaciones%2C%20respectivamente.>
- Klebel, T., Traag, V., Grypari, L., Stoy, L., y Ross-Hellauer, T. (2025). The academic impact of Open Science: a scoping review. *Royal Society Open Science*, 12(3), 241248. <https://doi.org/10.1098/rsos.241248>
- Nature index. (2024). 2024 Research Leaders: Leading countries/territories. <https://www.nature.com/nature-index/research-leaders/2024/country/all/all>
- Richtig, G., Berger, M., Lange-Asschenfeldt, B., Aberer, W., y Richtig, E. (2018). Problems and challenges of predatory journals. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 32(9), 1441-1449. <https://doi.org/10.1111/jdv.15039>
- Saenen, B., Ancion, Z., Borrell-Damián, L., Mounier, P., Oliva Uribe, D., Papp-Le Roy, N., y Rooryck, J. (2024, febrero 20). *2nd Diamond Open Access Conference Report*. 2nd Diamond Open Access Conference, Toluca, Mexico. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10684544>
- Zedda, M. (2025). Fare open access: storia, sviluppi e nuove sfide. *Recenti Progressi in Medicina*, 116(2), 89-99. <https://doi.org/10.1701/4450.44440>

## EDITORIAL

### The current context of scientific publishing

When discussing academic productivity, we refer to the generation and application of knowledge that make significant contributions to the advancement of a discipline. As indicated by Gordillo-Salazar et al. (2020), this productivity can be manifested in various academic products, including scientific publications and patents, among others.

According to the *Nature Research Leaders 2024* ranking, prepared by Nature Index (2024), which ranks countries by their research performance, Chile ranks 33<sup>rd</sup> worldwide and second in Latin America, registering a 4.7% increase. It is only surpassed by Brazil, which ranks 24<sup>th</sup>, although with a decrease of 12.4%. Iberti (2024), in the *La Tercera* newspaper, argues that the growth in Chilean academic productivity is a response to both increased access to domestic and international competitive funds and a strengthening of collaborative work between educational institutions. An example of this is the Universidad del Bío-Bío, which between 2019 and 2023 published 2,324 works, reflecting sustained growth thanks to strategic collaborations, technological development, and research financing policies that have strengthened its scientific capabilities.

Like any expansion process, both in domestic and international contexts, this growth brings with it benefits and challenges. The field of research is no exception. Along these lines, Bajpai (2015) mentions that it was Beall who, in 2010, first coined the term “*predatory publishers*”, i.e., “*predatory*” scientific publishers or journals. As described by Beall (2012), this concept refers to publications that imitate the name, design, and format of established and recognized open-access journals in their respective fields, but have no relation to them. These practices aim to deceive unsuspecting researchers into publishing on platforms that lack rigorous peer review, fail to adhere to recognizable scientific standards, and, furthermore, incur high hidden publication costs. It is essential to note that the existence of these journals is not solely attributable to those who promote them, but also to researchers who, for various reasons, utilize these unethical shortcuts to artificially inflate their academic productivity.

### Predatory journals: a threat to science

Among the most common characteristics that allow identifying predatory journals — as pointed out by Richtig et al. (2018) and Abad-García (2019)— there are: null or insufficient evaluation processes that result in

extremely fast publications; use of titles similar to those of legitimate and prestigious journals; inclusion of false editorial boards without the consent of the referenced people; use of non-existent or falsified metrics and impact indexes; invalid contact information that makes effective communication with editors impossible; excessively broad and dispersed topics; violation of ethical principles in publishing and scientific research; misleading claims about their indexing on recognized platforms such as *Web of Science*, *Scopus* or *PubMed*; articles published with spelling, typographical errors or broken links; and the use of e-mails for the receipt of manuscripts instead of professional editorial platforms.

### The value of the diamond scientific publication

Open access, as a model of knowledge dissemination, reached a foundational milestone with the *Budapest Conference* in 2001, although it gained greater notoriety with the *Berlin Conference* and the *Bethesda Declaration* in 2003 (Zedda, 2025; Klebel et al., 2025). From then on, the idea was promoted that publicly funded research should be made available to the entire society, thereby reducing economic, legal, and technological barriers to its consultation.

According to Klebel et al. (2025), five main types of open access are recognized:

- Gold Open Access (OA): Immediate and free access to the content, with publication costs usually covered by the authors or their institutions.
- Green OA: Self-archiving of a version of the article in open repositories, usually after an embargo period.
- Hybrid OA: Subscription journals that offer optional open access to specific articles for additional payments.
- Bronze OA: Free access granted by the publisher, without explicit open licenses.
- Diamond OA: Free and immediate access for both readers and authors, funded by academic institutions, consortia, or other non-profit entities.

In the report of the *Second Diamond Open Access Conference*, conducted in Mexico in 2023, Saenen et al. (2024) describe this model as a form of academic communication that ensures that research results are available immediately and without restrictions, through open licenses and without associated costs. This equitable approach not only democratizes access to knowledge, but also promotes the active participation of all those involved in its creation, dissemination, reuse, and preservation. In addition, it focuses on ensuring

the quality of content and guaranteeing the right of all citizens to benefit from scientific advances and their applications.

### **The role of Hábitat Sustentable in this ecosystem**

In this scenario of vertiginous transformation in scientific communication, the journal *Hábitat Sustentable* reaffirms its commitment to open, ethical, rigorous, and socially relevant science. Our editorial line not only adheres to the principles of diamond open access, but also serves as a publication space for research that addresses sustainability from critical and interdisciplinary perspectives, particularly from and for the Global South.

We publish without charging authors or readers, with rigorous peer-review processes, in three languages, and with an editorial policy that aims to strengthen emerging academic communities. In the face of the threats posed by predatory journals and the growing commodification of knowledge, *HS* is positioned as a safe, ethical, and professional platform. This makes it not only for established researchers, but also for new authors seeking to publish under high-quality standards.

Additionally, *HS* aims to foster a scientific mindset dedicated to addressing the social and environmental challenges of our territories. Sustainability, understood in an integral way—encompassing environmental, social, economic, and cultural aspects—requires open, collaborative, and transdisciplinary approaches. In this sense, we especially value those contributions that promote new ways of understanding the relationship between habitat, technology, and society.

We invite our readers, as well as academics, professionals, and students, to be an active part of this editorial project. Whether as authors, reviewers, or critical readers, their participation is essential to collectively build a more open, reliable, and relevant science.

## EDITORIAL

### O contexto atual da publicação científica

Quando discutimos a produtividade acadêmica, nos referimos à geração e à aplicação de conhecimentos que fazem contribuições significativas para o avanço de uma disciplina. Conforme indicado por Gordillo-Salazar et al. (2020), essa produtividade pode se manifestar em vários produtos acadêmicos, incluindo publicações científicas e patentes, entre outros.

De acordo com a classificação Nature Research Leaders 2024, elaborada pelo Nature Index (2024), que classifica os países por seu desempenho em pesquisa, o Chile ocupa a 33ª posição mundial e a segunda na América Latina, registrando um aumento de 4,7%. Só é superado pelo Brasil, que ocupa a 24ª posição, embora com uma queda de 12,4%. Iberti (2024), no jornal La Tercera, argumenta que o crescimento da produtividade acadêmica chilena é uma resposta tanto ao maior acesso a fundos competitivos nacionais e internacionais quanto ao fortalecimento do trabalho colaborativo entre instituições educacionais. Um exemplo disso é a Universidad del Bío-Bío, que entre 2019 e 2023 publicou 2.324 trabalhos, refletindo um crescimento sustentado graças a colaborações estratégicas, desenvolvimento tecnológico e políticas de financiamento de pesquisa que fortaleceram suas capacidades científicas.

Como em qualquer processo de expansão, tanto em contextos nacionais quanto internacionais, esse crescimento traz consigo benefícios e desafios. O campo da pesquisa não é exceção. Nesse sentido, Bajpai (2015) relata que foi Beall quem, em 2010, cunhou pela primeira vez o termo "predatory publishers", ou seja, editoras ou periódicos científicos "predatórios". Conforme descrito por Beall (2012), esse conceito refere-se a publicações que imitam o nome, o design e o formato de periódicos de acesso aberto estabelecidos e reconhecidos em seus respectivos campos, mas não têm relação com eles. Essas práticas buscam enganar pesquisadores desavisados para que publiquem em plataformas sem revisão rigorosa por pares, sem padrões científicos reconhecíveis e com altos custos de publicação ocultos. É importante ressaltar que a existência dessas revistas não se deve apenas àqueles que as promovem, mas também aos pesquisadores que, por diferentes motivos, acessam esses atalhos antiéticos para aumentar artificialmente sua produtividade acadêmica.

### Periódicos predatórios: uma ameaça à ciência

Entre as características mais comuns que nos permitem identificar os periódicos predatórios - de acordo com Richtig et al. (2018) e Abad-García (2019) - incluem:

processos de avaliação inexistentes ou insuficientes que resultam em publicações extremamente rápidas; uso de títulos semelhantes aos de periódicos legítimos e de prestígio; inclusão de conselhos editoriais falsos sem o consentimento dos indivíduos referenciados; uso de métricas e índices de impacto inexistentes ou falsificados; informações de contato inválidas que impossibilitam a comunicação efetiva com os editores; assunto excessivamente amplo e disperso; violação de princípios éticos na publicação e na pesquisa científica; alegações enganosas de indexação em bancos de dados reconhecidos, como Web of Science, Scopus ou PubMed; artigos publicados com erros ortográficos e tipográficos ou links quebrados; e o uso de e-mails para envio de manuscritos em vez de plataformas editoriais profissionais.

### O valor do diamante da publicação científica

O acesso aberto, como modelo de disseminação do conhecimento, teve um marco fundamental na Conferência de Budapeste em 2001, embora tenha ganhado maior visibilidade com a Conferência de Berlim e a Declaração de Bethesda em 2003 (Zedda, 2025; Klebel et al., 2025). A partir de então, foi promovida a ideia de que a pesquisa financiada com recursos públicos deveria ser disponibilizada para toda a sociedade, reduzindo as barreiras econômicas, legais e tecnológicas à sua consulta.

De acordo com Klebel et al. (2025), são reconhecidos cinco tipos principais de acesso aberto:

- Gold Open Access (OA): acesso imediato e gratuito ao conteúdo, com os custos de publicação geralmente cobertos pelos autores ou suas instituições.
- Verde OA: autoarquivamento de uma versão do artigo em repositórios abertos, geralmente após um período de embargo.
- Híbrido OA: periódicos por assinatura que oferecem acesso aberto opcional a determinados artigos mediante o pagamento de taxas adicionais.
- Bronze OA: acesso gratuito concedido pelo editor, sem licenças abertas explícitas.
- Diamond OA: acesso gratuito e imediato para leitores e autores, financiado por instituições acadêmicas, consórcios ou outras entidades sem fins lucrativos.

No relatório da Segunda Conferência Diamante de Acesso Aberto, realizada no México em 2023, Saenen et al. (2024) descrevem esse modelo como uma forma de comunicação acadêmica que garante que os resultados da pesquisa estejam disponíveis imediatamente e sem

restrições, por meio de licenças abertas e sem custos associados. Essa abordagem equitativa não apenas democratiza o acesso ao conhecimento, mas também promove a participação ativa de todos os envolvidos em sua criação, disseminação, reutilização e preservação. Ela também se concentra em assegurar a qualidade do conteúdo e garantir o direito de todos os cidadãos de se beneficiarem dos avanços científicos e de suas aplicações.

### O papel da Habitat Sustentable nesse ecossistema

Nesse cenário de vertiginosa transformação da comunicação científica, a revista Habitat Sustentable reafirma seu compromisso com a ciência aberta, ética, rigorosa e socialmente relevante. Nossa linha editorial não apenas adere aos princípios do acesso aberto diamante, mas também se projeta como um espaço de publicação de pesquisas que abordam a sustentabilidade a partir de perspectivas críticas e interdisciplinares, especialmente do e para o Sul Global.

Publicamos sem cobrar dos autores ou leitores, com processos rigorosos de revisão por pares, em três idiomas e com uma política editorial que visa fortalecer

as comunidades acadêmicas emergentes. Diante das ameaças representadas pelas revistas predatórias e da crescente mercantilização do conhecimento, a HS se posiciona como uma plataforma segura, ética e profissional. Isso faz com que ela não seja apenas para pesquisadores estabelecidos, mas também para novos autores que buscam publicar com altos padrões de qualidade.

O HS também busca promover o pensamento científico comprometido com os desafios sociais e ambientais de nossos territórios. A sustentabilidade, entendida de forma integral - ambiental, social, econômica e cultural -, exige abordagens abertas, colaborativas e transdisciplinares. Nesse sentido, valorizamos especialmente as contribuições que promovem novas formas de entender a relação entre habitat, tecnologia e sociedade.

Convidamos nossos leitores, bem como acadêmicos, profissionais e estudantes, a serem parte ativa deste projeto editorial. Seja como autores, revisores ou leitores críticos, sua participação é essencial para construirmos coletivamente uma ciência mais aberta, confiável e relevante.

Jocelyn Vidal-Ramos  
Magíster en Medio Ambiente  
Coordinadora editorial Hábitat Sustentable  
Encargada coordinación editorial Revistas de la Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño,  
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile  
<https://orcid.org/0000-0003-2155-3926>  
[javidal@ubiobio.cl](mailto:javidal@ubiobio.cl)



Rafael Eduardo López-Guerrero  
Doctorado en Ciencias de la Ingeniería  
Co-Editor Hábitat Sustentable, Profesor Asistente,  
Departamento de Ciencias de la Construcción, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño,  
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile  
<https://orcid.org/0000-0002-5941-0421>  
[rlopez@ubiobio.cl](mailto:rlopez@ubiobio.cl)



Maureen Trebilcock-Kelly  
Doctora en Arquitectura Sustentable  
Editora Responsable Hábitat Sustentable, Profesora Titular,  
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](mailto:mtrebilc@ubiobio.cl)



# IMPULSANDO COMUNIDADES ENERGÉTICAS EN COLOMBIA: RETOS Y OPORTUNIDADES PARA UNA TRANSICIÓN ENERGÉTICA DESCENTRALIZADA

## DRIVING THE DEVELOPMENT OF ENERGY COMMUNITIES IN COLOMBIA: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR A DECENTRALIZED ENERGY TRANSITION

## ESTÍMULO AO DESENVOLVIMENTO DE COMUNIDADES ENERGÉTICAS NA COLÔMBIA: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA UMA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DESCENTRALIZADA

### **María Fernanda Medina-Reyes**

Magíster en Seguridad de las TIC  
Docente de planta de la Escuela de Transformación Digital  
Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0003-1895-0859>  
mmedina@utb.edu.co

### **Juan Gabriel Fajardo-Cuadro**

Doctor en Ciencias Técnicas  
Docente de planta de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-5675-7796>  
jfajardo@utb.edu.co

### **Juan Carlos Martínez-Santos**

Doctor en Computer Engineering  
Docente de planta de la Escuela de Transformación Digital  
Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0003-2755-0718>  
jcmartinezs@utb.edu.co



## ABSTRACT

Energy communities represent a transformative paradigm for democratizing access to renewable energy, decentralizing power systems, and fostering economic sustainability. This study analyzes their global development, with an emphasis on developing countries such as Colombia. The research employs a systematic literature review in Scopus and a keyword co-occurrence analysis to identify trends; in addition, Colombian regulatory documents were examined to contextualize the findings. The discussion addresses distributed generation, peer-to-peer (P2P) energy trading, and regulatory frameworks that drive local energy transitions. Although the opportunities are significant in Colombia, challenges persist in infrastructure, regulation, and social acceptance, particularly in the Caribbean region. The article proposes context-specific strategies from international experiences to overcome these barriers and consolidate decentralized energy systems that accelerate the country's energy transition and sustainable development.

### Keywords

electricity, energy policy, energy resources

## RESUMEN

Las comunidades energéticas representan un paradigma transformador para democratizar el acceso a energías renovables, descentralizar los sistemas energéticos y fomentar la sostenibilidad económica. Este estudio analiza su desarrollo global, con énfasis en países en vías de desarrollo como Colombia. La investigación utiliza una revisión sistemática en Scopus y un análisis de co-ocurrencia de palabras clave para identificar tendencias; además, se revisaron documentos regulatorios colombianos para contextualizar los hallazgos. Se abordan la generación distribuida, el comercio entre pares (P2P) y los marcos regulatorios que impulsan transiciones energéticas locales. En Colombia, aunque las oportunidades son significativas, persisten retos de infraestructura, regulación y aceptación social, especialmente en el Caribe. Este artículo propone estrategias adaptadas basadas en experiencias internacionales para superar dichas barreras y consolidar sistemas descentralizados que aceleren la transición energética y el desarrollo sostenible del país.

### Palabras clave

energía eléctrica, política energética, recursos energéticos

## RESUMO

As comunidades energéticas representam um paradigma transformador para democratizar o acesso à energia renovável, descentralizar os sistemas energéticos e promover a sustentabilidade econômica. Este estudo analisa seu desenvolvimento global, com ênfase em países em desenvolvimento, como a Colômbia. A pesquisa emprega uma revisão sistemática da literatura no Scopus e uma análise de coocorrência de palavras-chave para identificar tendências. Além disso, documentos regulatórios colombianos foram examinados para contextualizar os resultados. A discussão aborda a geração distribuída, o comércio de energia ponto a ponto (P2P) e os marcos regulatórios que impulsionam as transições energéticas locais. Embora as oportunidades sejam significativas na Colômbia, persistem desafios em infraestrutura, regulamentação e aceitação social, particularmente na região do Caribe. O artigo propõe estratégias específicas para o contexto, a partir de experiências internacionais, para superar essas barreiras e consolidar sistemas energéticos descentralizados que acelerem a transição energética e o desenvolvimento sustentável do país.

### Palavras-chave:

energia elétrica, política energética, recursos energéticos

## INTRODUCCIÓN

En el contexto global de transición energética, las fuentes de energía limpia han surgido como una solución fundamental a los desafíos asociados con el cambio climático, la seguridad energética y el desarrollo sustentable. Estas fuentes, caracterizadas por un impacto medioambiental mínimo, tienen como objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover sistemas energéticos más resistentes y descentralizados. Según Andoni et al. (2019), blockchain y otras tecnologías avanzadas están transformando los modelos energéticos tradicionales al permitir la gestión descentralizada y el comercio de energía entre pares (P2P). Mollah et al. (2021) destacan que las redes inteligentes habilitadas para blockchain abordan las preocupaciones de seguridad en las transacciones y facilitan la integración de recursos renovables en sistemas descentralizados. La integración de los recursos energéticos distribuidos (DER, en inglés) ha catalizado aún más la adopción de energías renovables y la creación de comunidades energéticas, fomentando la participación de los prosumidores en los mercados energéticos locales (Morstyn et al., 2019). Estas innovaciones contribuyen no solo a la sustentabilidad ambiental, sino también a la cohesión social y al desarrollo económico local (Siano et al., 2019), marcando un camino claro hacia la transición energética global.

La transición hacia la sustentabilidad requiere no solo fuentes renovables, sino también tecnologías avanzadas que optimicen el uso de los recursos. En este contexto, la energía P2P se ha convertido en un mecanismo clave, que permite transacciones directas entre prosumidores y consumidores dentro de las comunidades energéticas. Este enfoque democratiza el acceso y facilita un mercado energético descentralizado y flexible (Wang et al., 2019). Los sistemas P2P reducen los costos de energía y promueven el uso eficiente de las energías renovables. Por ejemplo, Zia et al. (2020) muestran cómo las transacciones locales facilitan la integración renovable en microrredes, mientras que Siano et al. (2019) demuestran cómo la tecnología de contabilidad distribuida (DLT, en inglés) permite transacciones de energía seguras a través de contratos inteligentes, optimizando el equilibrio entre la oferta y la demanda. Mollah et al. (2021) advierten que la descentralización es fundamental para las futuras redes inteligentes, integrando blockchain para superar las barreras técnicas.

Sin embargo, la adopción de estos sistemas presenta desafíos normativos y técnicos, especialmente en regiones donde aún dominan las estructuras centralizadas. Andoni et al. (2019) y Soto et al. (2021) enfatizan la necesidad de claridad normativa e infraestructura robusta para implementar modelos P2P en regiones emergentes de manera efectiva.

Las comunidades energéticas desempeñan un papel crucial en esta transición, sirviendo como catalizadores de tecnologías renovables y mecanismos de gobernanza autónomos. Unen a prosumidores y consumidores en mercados dinámicos, aprovechando tecnologías como blockchain para garantizar transacciones seguras y transparentes (Gu et al., 2023; Wang et al., 2019). La implementación europea ha demostrado que estas iniciativas pueden mejorar la resiliencia energética

y reducir las emisiones de carbono, donde la integración de contratos inteligentes permite la automatización de procesos, mejorando el desempeño económico y ambiental (Andoni et al., 2019; Mollah et al., 2021). Mollah et al. (2021) argumentan que combinar blockchain y redes inteligentes es clave para administrar las crecientes transacciones de energía de manera eficiente.

A pesar de estos beneficios, las comunidades energéticas aún enfrentan barreras normativas, técnicas y de infraestructura en los países en vías de desarrollo. Esto subraya la necesidad de realizar más investigaciones para diseñar modelos adaptativos que reflejen las condiciones locales y garanticen la viabilidad a largo plazo (Gu et al., 2023; Siano et al., 2019).

## OBJETIVOS DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y CONTRIBUCIÓN AL ÁREA

En el contexto colombiano, las comunidades energéticas representan un enfoque estratégico para abordar desafíos persistentes como la pobreza energética, el suministro de electricidad poco confiable y las barreras normativas. El marco legislativo actual, impulsado por el Ministerio de Minas y Energía y la Comisión de Regulación de Energía y Gas (Comisión de Regulación de Energía y Gas -República de Colombia, 2011; Ministerio de Minas y Energía -República de Colombia, 2023b), permite el establecimiento de autogeneradores colectivos (AGRC) y generadores colectivos distribuidos (GDC), fomentando la adopción de fuentes de energía renovables no convencionales (ERNCC), incluidas la solar, eólica y la biomasa. Estas regulaciones, junto con incentivos específicos para proyectos en la región del Caribe, ofrecen un potencial importante para mejorar el acceso a la energía en áreas afectadas por tarifas altas e infraestructura limitada.

A nivel mundial, las tecnologías avanzadas como blockchain y los contratos inteligentes han transformado los mercados energéticos, permitiendo transacciones seguras y transparentes entre prosumidores y consumidores. Estudios realizados por Andoni et al. (2019) y Siano et al. (2019) han demostrado cómo el comercio P2P democratiza el acceso a la energía renovable, reduce las emisiones de carbono y mejora la gobernanza local. Estas experiencias internacionales entregan información valiosa para Colombia, particularmente en lo que respecta a la integración de plataformas digitales que mejoran la gestión energética y fomentan la participación comunitaria.

El objetivo de esta revisión bibliográfica es analizar cómo las comunidades energéticas, apoyadas en innovaciones tecnológicas y marcos normativos adaptativos, pueden contribuir a una transición energética descentralizada en Colombia.

## METODOLOGÍA

Este estudio se basa en la identificación de tendencias clave y patrones emergentes relacionados con las comunidades energéticas y su integración con tecnologías avanzadas como blockchain y contratos inteligentes. La base de datos



El análisis de concurrencia de palabras clave identificó tres grupos temáticos principales que reflejan áreas de investigación predominantes en comunidades energéticas y tecnologías avanzadas: transición energética y comunidades energéticas, blockchain y tecnologías digitales, y gestión y eficiencia energética. A continuación se muestra una síntesis de los hallazgos reunidos por grupo, destacando los conceptos principales y su contexto dentro del campo.

- **Transición energética y comunidades energéticas (rojo):** Este grupo se centra en la investigación sobre la creación de modelos sustentables de generación y almacenamiento de energía. Enfatiza la integración de fuentes renovables, la participación activa de las comunidades energéticas y la importancia de los mercados descentralizados de energía. La fuerte conexión entre "intercambio de energía" y "comunidad energética" destaca el papel crucial de los prosumidores y las iniciativas locales en la transición energética. Los conceptos principales son "Comunidad energética", "Energía alternativa", "Almacenamiento de energía", "Transiciones energéticas" y "Uso compartido de energía".
- **Blockchain y tecnologías digitales (verde):** Este grupo refleja el creciente interés en implementar tecnologías avanzadas como blockchain y contratos inteligentes. Estas herramientas permiten el comercio descentralizado de energía, facilitan las transacciones P2P y garantizan la seguridad, transparencia y eficiencia de los mercados energéticos locales. Los vínculos entre "blockchain" y "contratos inteligentes" subrayan su importante papel como facilitadores clave en el desarrollo de sistemas energéticos modernos y descentralizados. Los conceptos principales son "Blockchain", "Libro de contabilidad distribuido", "Comercio entre pares", "Comercio de energía" y "Contratos inteligentes".
- **Gestión y Eficiencia Energética (azul):** Este grupo refleja el creciente interés en implementar tecnologías avanzadas. Estas herramientas permiten el comercio descentralizado de energía, facilitan las transacciones P2P y garantizan la seguridad, transparencia y eficiencia de los mercados energéticos locales. Los vínculos entre "blockchain" y "contratos inteligentes" subrayan su importante papel como facilitadores clave en el desarrollo de sistemas energéticos modernos y descentralizados. Los conceptos principales incluyen "Fuente de energía renovable", "Microrred", "Recursos energéticos distribuidos" y "Eficiencia energética".

## DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS COMUNIDADES ENERGÉTICAS

Las comunidades energéticas son un modelo transformador para avanzar en sistemas energéticos sustentables y descentralizados. Involucran a ciudadanos, empresas y organizaciones locales que colaboran en la producción, consumo y comercialización de energía renovable. Basadas en los principios de sostenibilidad, empoderamiento local y gobernanza descentralizada, estas comunidades promueven la gestión energética inclusiva y participativa (Soto et al., 2021).

Una característica clave de las comunidades energéticas es su capacidad para operar de forma autónoma dentro de los mercados locales, utilizando tecnologías como blockchain y contratos inteligentes para permitir el comercio de energía entre pares seguro y transparente (Mollah et al., 2021; Wang et al., 2019). Muchos también implementan microrredes para optimizar los recursos energéticos distribuidos y mejorar la resiliencia a los riesgos ambientales y normativos (Zia et al., 2020).

A nivel internacional, las comunidades energéticas han ayudado a abordar la pobreza energética y los déficits de infraestructura. En Europa, la Directiva de Energías Renovables de 2019 ha alentado a las comunidades de energías renovables a mejorar la participación ciudadana y la adopción de energías renovables (Gjorgievski et al., 2021). En América Latina, particularmente en áreas rurales y desatendidas, las microrredes comunitarias ofrecen electricidad confiable y sustentable que respalda el desarrollo social y económico (Soto et al., 2021).

## EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE COMUNIDADES ENERGÉTICAS

La noción de comunidades energéticas ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, convirtiéndose en un factor clave en el cambio hacia sistemas energéticos más sostenibles y descentralizados. Estas comunidades, que reúnen a prosumidores, administradores locales y otras partes interesadas, tienen como objetivo democratizar la producción, el consumo y el comercio de energía mediante la implementación de tecnologías avanzadas como blockchain y contratos inteligentes. Este modelo promueve la sustentabilidad ambiental, fortalece la cohesión social y fomenta el desarrollo económico local (Gu et al., 2023; Stefan et al., 2020). Las comunidades energéticas aprovechan las fuentes de energía renovables no convencionales (ERNC), como la solar y la eólica, para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y aumentar la resiliencia a los desafíos climáticos y normativos. (Zia et al., 2020).

A nivel mundial, las comunidades energéticas han demostrado ser herramientas prácticas para abordar los problemas de acceso a la energía y la pobreza energética. En contextos locales, como la región caribeña de Colombia, presentan una oportunidad para transformar los sistemas energéticos y promover la equidad social. Su desarrollo, impulsado por los avances tecnológicos y los marcos normativos, permite la participación ciudadana en los mercados energéticos. Sin embargo, su implementación varía según las condiciones socioeconómicas y climáticas de cada región, lo que subraya la importancia de un enfoque adaptativo para garantizar el éxito. Dichos enfoques adaptativos deben ser sensibles al contexto, integrando la gobernanza participativa, la colaboración institucional y la selección de tecnología apropiada basada en la capacidad local. Los modelos exitosos deben considerar no solo la viabilidad técnica, sino también la aceptación cultural, la asequibilidad y la propiedad comunitaria a largo plazo para garantizar que las comunidades energéticas sean inclusivas, resilientes y sustentables.

## PARTES INTERESADAS CLAVE: PROSUMIDORES, ADMINISTRADORES LOCALES Y PARTICIPANTES DEL MERCADO

Las partes interesadas clave en las Comunidades energéticas incluyen prosumidores, administradores locales y participantes del mercado, cada uno de los cuales desempeña un papel fundamental para garantizar el funcionamiento y la sustentabilidad de estos sistemas.

- Prosumidores: individuos o entidades que producen y consumen energía. Según Wang et al. (2019), la participación de los prosumidores a través de plataformas descentralizadas, como las basadas en blockchain, facilita transacciones energéticas confiables y fomenta la adopción de tecnologías de energía renovable (Ariza et al., 2020).
- Administradores locales: coordinan las actividades de la comunidad, incluidas la planificación energética y la mediación entre los miembros. Su papel es crucial para implementar modelos de gobernanza participativa y garantizar el cumplimiento de los estándares normativos. Como Stefan et al. (2020) destacan, este papel es especialmente significativo en entornos locales donde las necesidades y los recursos energéticos varían ampliamente.
- Participantes del mercado: este grupo incluye a operadores de sistemas, desarrolladores de tecnología y otros actores que brindan infraestructura y servicios críticos. Facilitan la integración de tecnologías avanzadas, como contratos inteligentes y sistemas de monitoreo en tiempo real, para mejorar la eficiencia operativa y la transparencia dentro del sistema energético (Mollah et al., 2021).

La Figura 2 ilustra un modelo conceptual de comercio de energía P2P en comunidades energéticas. Destaca las principales interacciones entre los actores clave: consumidores, prosumidores y la empresa de servicios básicos, todos coordinados por un administrador de intercambio de energía.

Estos actores pueden comerciar energía entre ellos o con los consumidores, gestionando tanto la generación como el consumo. La empresa de servicios básicos brinda respaldo al sistema, ofreciendo precios de compra y de exportación de energía para equilibrar los excedentes o la escasez en la producción de energía comunitaria. El administrador de intercambio de energía supervisa las transacciones de energía entre los participantes, asegurando el cumplimiento eficiente de las necesidades energéticas, a la vez que mantiene la transparencia y seguridad en los flujos de energía y los acuerdos financieros. La Figura 2 resalta los flujos de energía (representados por flechas), así como las transacciones de comercio de energía (etiquetadas como "comercio"). Subraya el importante papel de los prosumidores en el fomento de un modelo descentralizado de generación y consumo de energía.

## TECNOLOGÍAS HABILITADORAS PARA COMUNIDADES ENERGÉTICAS

El desarrollo de comunidades energéticas, impulsado por tecnologías avanzadas, facilita la descentralización de los sistemas energéticos y optimiza la gestión de los recursos. Las herramientas líderes utilizadas son blockchain y contratos inteligentes, que permiten transacciones de energía seguras

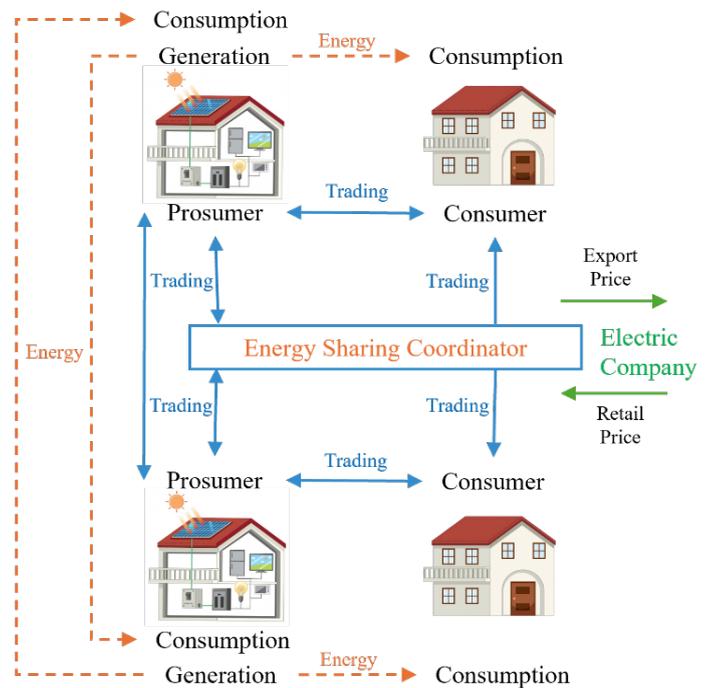


Figura 2. Modelo conceptual del comercio de energía P2P en comunidades energéticas. Fuente: Adaptado de Soto et al. (2021).

y transparentes, al tiempo que eliminan intermediarios y reducen los costos operativos (Andoni et al., 2019; Gu et al., 2023; Zia et al., 2020). Estas tecnologías permiten a los prosumidores y otros participantes del mercado participar activamente en modelos descentralizados, automatizando procesos críticos como la liquidación de transacciones y la gestión de activos energéticos (Wang et al., 2019).

La energía transactiva es otro facilitador clave, que integra mecanismos económicos y de control para equilibrar la oferta y la demanda en tiempo real dentro de las microrredes y los mercados energéticos locales (Siano et al., 2019; Zia et al., 2020). Dichos sistemas aprovechan las tecnologías digitales y de comunicación para gestionar los recursos energéticos distribuidos (DER, en inglés), fomentando la participación de los prosumidores en los mercados P2P. Ejemplos exitosos de esto incluyen iniciativas como Power Ledger y PROSUME, que demuestran el potencial transformador de estos modelos en los mercados locales e internacionales (Gjorgievski et al., 2021). Del mismo modo, tecnologías como el internet de las cosas (IoT, en inglés) y la digitalización mejoran la conectividad entre dispositivos inteligentes en hogares y empresas. Los medidores inteligentes y las plataformas de análisis en tiempo real optimizan la generación y el consumo de energía, mejorando la eficiencia energética y promoviendo la adopción de energías renovables. (Miglani et al., 2020; Mollah et al., 2021).

Finalmente, los casos en Europa, Australia y América Latina muestran cómo estas tecnologías remodelan los mercados energéticos. Los proyectos piloto han demostrado su capacidad para integrar energías renovables, reducir emisiones y promover la cohesión social en las comunidades energéticas (Gjorgievski et al., 2021; Gu et al., 2023; Stefan et al., 2020).

## BLOCKCHAIN Y CONTRATOS INTELIGENTES: LA BASE DE LA DESCENTRALIZACIÓN ENERGÉTICA

La tecnología blockchain y los contratos inteligentes han surgido como elementos fundamentales para transformar y descentralizar los sistemas energéticos modernos. Blockchain proporciona una infraestructura distribuida, segura y transparente para registrar transacciones de energía, eliminando efectivamente intermediarios y reduciendo los costos operativos. Por otro lado, los contratos inteligentes son herramientas digitales que ejecutan transacciones de energía de forma automática, reduciendo la necesidad de intermediarios y minimizando errores. (Kumari et al., 2022; Mollah et al., 2021).

En el contexto energético, estas tecnologías facilitan la implementación de mercados P2P, donde los prosumidores pueden intercambiar directamente excedentes de energía renovable con otros usuarios. Esto promueve la participación de la comunidad local e impulsa la sostenibilidad económica y ambiental. Ejemplos como el proyecto Brooklyn Microgrid en los Estados Unidos y Power Ledger en Australia demuestran el impacto transformador de blockchain al permitir la gestión descentralizada de los recursos energéticos (Gjorgievski et al., 2021; Sousa et al., 2019). Blockchain también aborda desafíos críticos como la ciberseguridad mediante el empleo de mecanismos criptográficos avanzados, para proteger los datos de los usuarios y garantizar la integridad de las transacciones.

La Figura 3 ilustra la arquitectura de un sistema de gestión de energía descentralizado que comprende medidores inteligentes, líneas de comunicación de datos e infraestructura de energía. Cada hogar, incluidos consumidores y prosumidores, está equipado con un medidor inteligente que monitorea el consumo o la generación de energía en tiempo real. Estos medidores están interconectados a través de redes digitales seguras con una plataforma de administración central, potencialmente respaldada por blockchain y contratos inteligentes, y se comunican con la infraestructura del operador del sistema de distribución (DSO, en inglés). El sistema permite el comercio de energía entre pares, a la vez que mantiene la coordinación con el DSO para garantizar la estabilidad de la red y la confiabilidad del sistema. Los flujos de energía están representados por líneas discontinuas naranjas, mientras que los flujos de datos se muestran como líneas azules continuas. Esta configuración integrada admite transacciones automatizadas, equilibrio de carga eficiente y mayor resiliencia a las fluctuaciones locales en la demanda o el suministro. La figura destaca cómo la infraestructura física y los actores institucionales están conectados a través de herramientas digitales para activar mercados energéticos descentralizados seguros y dinámicos.

## ENERGÍA TRANSACTIVA Y COMERCIO P2P QUE REDEFINEN LOS MERCADOS LOCALES

La energía transactiva y el comercio P2P están remodelando los mercados energéticos al permitir intercambios directos entre consumidores y prosumidores,

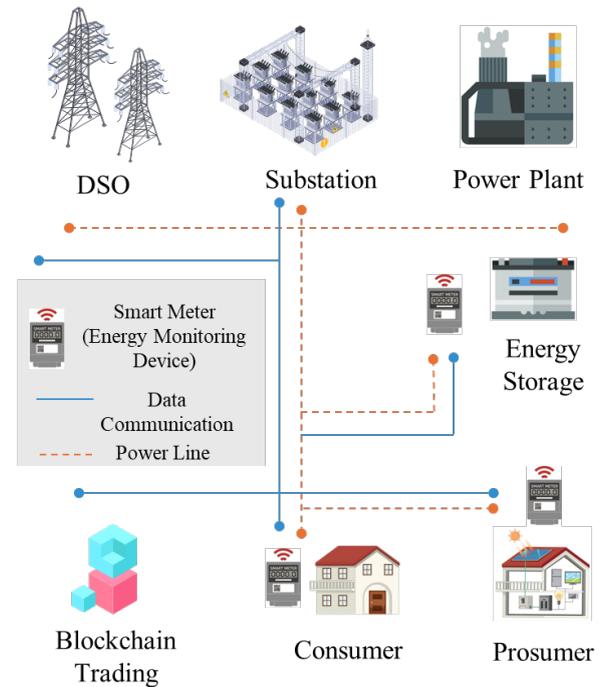


Figura 3. Concepto de un sistema de comercio de energía. Fuente: Preparado por los autores.

eliminando intermediarios tradicionales y fomentando la descentralización de los sistemas energéticos. Estos modelos aprovechan tecnologías como blockchain y plataformas digitales, lo que permite un comercio eficiente y transparente de energía renovable en tiempo real (Soto et al., 2021). Transactive energy se basa en algoritmos avanzados para equilibrar dinámicamente la oferta y la demanda en microrredes locales. Estas herramientas optimizan el flujo de energía, minimizan las pérdidas y respaldan la integración de fuentes renovables como la solar y la eólica. Además, los controladores transactivos ajustan automáticamente el consumo del usuario en función de las señales económicas, lo que mejora la sostenibilidad del sistema (Siano et al., 2019).

El comercio P2P, a su vez, permite a los prosumidores maximizar el uso de sus recursos de energía renovable y obtener beneficios financieros al vender el exceso de energía directamente a otros usuarios. Los estudios en Colombia enfatizan el potencial del comercio P2P para empoderar a los usuarios finales y aumentar su participación en el mercado energético. Por ejemplo, la "Iniciativa de energía transactiva para Colombia" ha identificado estructuras de preferencia de los usuarios para diseñar modelos de negocio que integren este tipo de transacciones (Cárdenas-Álvarez et al., 2022). Sin embargo, estos modelos enfrentan importantes desafíos normativos y tecnológicos. En Colombia, la ausencia de marcos legales específicos para regular las transacciones energéticas descentralizadas constituye un obstáculo para su implementación generalizada. Asimismo, los costos iniciales de infraestructura, como medidores inteligentes y plataformas digitales, limitan la adopción, particularmente en áreas rurales y subdesarrolladas (González-Dumar et al., 2024).

En resumen, la energía transactiva y el comercio P2P ofrecen una oportunidad única para descentralizar los mercados energéticos y empoderar a los consumidores. No obstante, para aprovechar plenamente su potencial, las políticas adaptativas y las alianzas estratégicas son fundamentales para superar las barreras tecnológicas y normativas, especialmente en contextos emergentes como Colombia (Zia et al., 2020).

## CASOS DE USO Y EXPERIENCIAS INTERNACIONALES

La selección de países desarrollados con contextos muy diferentes a Colombia, como Alemania, Dinamarca, Japón o Australia, permite destacar aportes específicos en diferentes sistemas energéticos descentralizados, brindando ideas valiosas para la transición energética de Colombia como modelos a seguir.

En Europa, Alemania está a la vanguardia de la gobernanza de las energías renovables y las iniciativas impulsadas por los ciudadanos. Su política *Energiewende* aboga por modelos energéticos colaborativos que involucren a todas las partes interesadas. Al usar la tecnología blockchain, Alemania está mejorando la transparencia y reduciendo los costos operativos, estableciendo un punto de referencia para la gobernanza participativa y la adaptación normativa (Mollah et al., 2021). Por otro lado, Dinamarca sobresale en la innovación energética impulsada por el mercado, particularmente a través de plataformas de negociación entre pares (P2P). Estas plataformas permiten a los prosumidores intercambiar excedentes de energía, optimizando la dinámica de la oferta y la demanda y asegurando la estabilidad de la red. El éxito de Dinamarca proporciona un modelo replicable para la integración de sistemas distribuidos de energía renovable en Colombia (Wang et al., 2019).

Un ejemplo del continente asiático es Japón. Este país ha tenido éxito en la implementación de microrredes que integran almacenamiento solar y distribuido. Estos sistemas aseguran la continuidad de la energía durante emergencias, mitigando las vulnerabilidades inherentes a las redes centralizadas. Este enfoque es particularmente instructivo para las regiones propensas a desastres (como Colombia), destacando la necesidad de una infraestructura energética robusta y adaptable (Siano et al., 2019).

Finalmente, las plataformas de comercio de energía P2P de Australia, ejemplificadas por iniciativas como Power Ledger, permiten transacciones directas entre prosumidores. Este modelo promueve mercados energéticos inclusivos y sustentables, al tiempo que reduce la dependencia de las redes centralizadas. La experiencia del país se alinea con el objetivo de Colombia de empoderar a las comunidades energéticas locales a través de soluciones descentralizadas (Wang et al., 2019).

Al sintetizar el marco de gobernanza de Alemania, las innovaciones de mercado de Dinamarca, las estrategias de resiliencia de Japón y los sistemas P2P de Australia, Colombia puede formular un plan integral de transición energética. Este enfoque podría abordar los desafíos normativos, de infraestructura y socioeconómicos del país

y abrir la puerta a un futuro energético descentralizado y sustentable. Las experiencias internacionales han destacado la eficacia de combinar tecnologías avanzadas, incluidas blockchain y contratos inteligentes, con modelos cooperativos y regulaciones inclusivas. Estas experiencias también subrayan el papel transformador de las tecnologías emergentes para optimizar la gestión de los recursos y generar confianza entre las partes interesadas del mercado. Por ejemplo, el uso de blockchain en Europa ha mejorado la trazabilidad y la seguridad de las transacciones energéticas, reforzando la participación de los prosumidores a través del comercio entre pares (Tkachuk et al., 2023).

## CONCLUSIONES

El desarrollo de comunidades energéticas, incluida Colombia, se ha convertido en una estrategia fundamental para promover sistemas energéticos sustentables y descentralizados en todo el mundo. Este modelo democratiza el acceso a la energía, reduce las emisiones de carbono y promueve la sustentabilidad socioeconómica mediante la integración de tecnologías emergentes y marcos normativos adaptativos.

En Colombia, las comunidades energéticas ofrecen una oportunidad estratégica para abordar desafíos de larga data, como la pobreza energética y la electrificación limitada en regiones rurales y no interconectadas. La región del Caribe tiene un potencial significativo para la generación distribuida debido a sus abundantes recursos renovables (Ministerio de Minas y Energía - República de Colombia, 2024).

Sin embargo, el país enfrenta barreras normativas, técnicas y sociales. Aunque la Ley 2099 de 2021 y la Resolución 701 de 2024 de CREG establecen las bases para la creación de comunidades energéticas, se necesita mayor claridad normativa, así como mecanismos de financiamiento para incentivar la participación de prosumidores a pequeña escala (Ministerio de Minas y Energía-República de Colombia, 2023b). Los proyectos piloto en el Departamento de Bolívar han demostrado la viabilidad de tales iniciativas, destacando la importancia de adaptar los modelos internacionales a las realidades locales (Departamento Nacional de Planeación - República de Colombia, 2023; Molina et al., 2022). Con base en esto, consideramos que las principales estrategias para lograr una transición energética sostenible en Colombia serían las siguientes:

- Fortalecimiento del marco regulatorio: diseñar regulaciones inclusivas que incentiven la inversión privada y reduzcan las barreras para la adopción de tecnologías emergentes.
- Fomento de acciones educativas y de concientización comunitaria: implementar programas educativos para sensibilizar a las comunidades locales sobre los beneficios de la energía renovable y la gestión descentralizada.
- Desarrollo de asociaciones público-privadas: fomentar la colaboración entre universidades, empresas

de tecnología y gobiernos locales para acelerar la adopción de soluciones innovadoras. Las universidades pueden desempeñar un papel crucial en la investigación, el desarrollo y la capacitación técnica, asegurando que las comunidades tengan las herramientas y el conocimiento necesarios para administrar sus recursos energéticos.

- Invertir en infraestructura y tecnología: priorizar el despliegue de medidores inteligentes, sistemas de almacenamiento y plataformas digitales para facilitar el comercio P2P y la gestión eficiente de los recursos energéticos.

La transición hacia comunidades energéticas en Colombia demanda un enfoque integral que combine tecnología, regulación y participación ciudadana. Las universidades están llamadas a encabezar iniciativas de capacitación técnica y participación pública, tendiendo puentes entre el desarrollo tecnológico y las necesidades locales. Su participación en el diseño de proyectos piloto, junto con la cooperación con los sectores privado y gubernamental, será fundamental para garantizar la viabilidad y escalabilidad de estas iniciativas.

En resumen, las comunidades energéticas son impulsoras del cambio tecnológico y herramientas esenciales para fortalecer la cohesión social y cultivar una cultura de sustentabilidad. Su implementación práctica requiere un compromiso sostenido de todos los sectores, asegurando que los beneficios de la transición energética sean accesibles para toda la población colombiana. La acción oportuna y decisiva sigue siendo esencial para empoderar a las comunidades, fortalecer las capacidades institucionales y tecnológicas e impulsar la transición hacia un futuro energético descentralizado e inclusivo, que garantice la sustentabilidad y la equidad social a largo plazo.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, M. F. M. R. y J. G. F. C.; Curación De Datos, M. F. M. R.; Análisis Formal, M. F. M. R.; Adquisición De Financiación, M. F. M. R.; Investigación, M. F. M. R.; Metodología, M. F. M. R.; Administración De Proyectos, M. F. M. R. y J. C. M. S.; Recursos, M. F. M. R.; Software, M. F. M. R.; Supervisión, M. F. M. R. & J. C. M. S.; Validación, M. F. M. R. & J. G. F. C.; Visualización, M. F. M. R. & J. G. F. C.; Escritura - revisión y edición, M. F. M. R., J. C. M. S. & J. G. F. C.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Convocatoria 933 "Formación en doctorados nacionales con enfoque territorial, étnico y de género en el marco de la política de misión-2023" del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P., & Peacock, A. (2019). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *100*, 143–174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>

Ariza, H., Martínez-Santos, J. C., Payares, E. D., Medina, M. F., Dominguez-Jiménez, J. A., & Campillo, J. (2020, October 13-16). *A blockchain solution for operational parameters monitoring platform for DC microgrids* [Paper presentation]. 2020 IEEE ANDESCON Conference, Quito, Ecuador, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON50619.2020.9272035>

Cárdenas-Álvarez, J. P., España, J. M., & Ortega, S. (2022). What is the value of peer-to-peer energy trading? A discrete choice experiment with residential electricity users in Colombia. *Energy Research & Social Science*, *91*, 102737. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102737>

Codina, L. (2005). Scopus: el mayor navegador científico de la web. *El Profesional de la Información*, *14*(1), 44-49. <https://www.epn.edu.ec/wp-content/uploads/2017/03/Scopus-el-mayor-navegador.pdf>

Comisión de Regulación de Energía y Gas – República de Colombia. (2011). *El Mercado Eléctrico Colombiano*. <https://creg.gov.co/publicaciones/8206/como-funciona-el-mercado-electrico-de-colombia/>

Departamento Nacional de Planeación – República de Colombia. (2023). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026. Potencia mundial de la vida*. <https://www.dnp.gov.co/plan-nacional-desarrollo/pnd-2022-2026>

Gjorgievski, V. Z., Cundeva, S., & Georghiou, G. E. (2021). Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: A review. *Renewable Energy*, *169*, 1138–1156. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.078>

González-Dumar, A., Arango-Aramburo, S., & Correa-Posada, C. M. (2024). Quantifying power system flexibility for the energy transition in Colombia. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, *155*, 109614. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109614>

Gu, B., Mao, C., Wang, D., Liu, B., Fan, H., Fang, R., & Sang, Z. (2023). A data-driven stochastic energy sharing optimization and implementation for community energy storage and PV prosumers. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, *34*, 101061. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101051>

Kumari, A., Sukharamwala, U. C., Tanwar, S., Raboaca, M. S., Alqahtani, F., Tolba, A., Sharma, R., Aschilean, I., & Mihaltan, T. C. (2022). Blockchain-Based Peer-to-Peer Transactive Energy Management Scheme for Smart Grid System. *Sensors*, *22*(13), 4826. <https://doi.org/10.3390/s22134826>

Migliani, A., Kumar, N., Chamola, V., & Zeadally, S. (2020). Blockchain for Internet of Energy management: Review, solutions, and challenges. *Computer Communications*, *151*, 395–418. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.01.014>

Ministerio de Minas y Energía – República de Colombia. (2023a). *ABC de Comunidades Energéticas*. <https://www.minenergia.gov.co/documents/11069/ABC-ComunidadesEnergeticas-2023.pdf>

Ministerio de Minas y Energía – República de Colombia. (2023b). *Decreto 2236 de 2023*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=227230>

Ministerio de Minas y Energía – República de Colombia. (2024). *Comisión de Regulación de Energía y Gas, Proyecto de Resolución N°.701 068 de 2024*. [https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/originales/Proyecto\\_Resoluci%C3%B3n\\_CREG\\_701\\_068\\_2024/Proyecto\\_Resoluci%C3%B3n\\_CREG\\_701\\_068\\_2024.pdf](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/originales/Proyecto_Resoluci%C3%B3n_CREG_701_068_2024/Proyecto_Resoluci%C3%B3n_CREG_701_068_2024.pdf)

Molina, J. D., Buitrago, L. F., Téllez, S. M. G., Giraldo, S. Y., & Uribe, J. A. (2022). Technological Architecture Design for Energy Communities: The Colombian Case. *2022 IEEE PES Generation, Transmission and Distribution Conference and Exposition – Latin America (IEEE PES GTD Latin America)*, La Paz, Bolivia, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IEEEPESGTDLatinAmeri53482.2022.10038297>

Mollah, M. B., Zhao, J., Niyato, D., Lam, K. Y., Zhang, X., Ghias, A. M. Y. M., Koh, L. H., & Yang, L. (2021). Blockchain for Future Smart Grid: A Comprehensive Survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(1), 18–43. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2993601>

Morstyn, T., Teytelboym, A., & McCulloch, M. D. (2019). Designing decentralized markets for distribution system flexibility. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(3), 1–12. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2886244>

Siano, P., De Marco, G., Rolan, A., & Loia, V. (2019). A Survey and Evaluation of the Potentials of Distributed Ledger Technology for Peer-to-Peer Transactive Energy Exchanges in Local Energy Markets. *IEEE Systems Journal*, 13(3), 3454–3466. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2903172>

Soto, E. A., Bosman, L. B., Wollega, E., & Leon-Salas, W. D. (2021). Peer-to-peer energy trading: A review of the literature. *Applied Energy*, 283, 116268. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116268>

Sousa, T., Soares, T., Pinson, P., Moret, F., Baroche, T., & Sorin, E. (2019). Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 367–378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.036>

Stefan, M., Zehetbauer, P., Cejka, S., Zeilinger, F., & Taljan, G. (2020). Blockchain-based self-consumption optimisation and energy trading in renewable energy communities. *CIREC 2020 Berlin Workshop*, 2020(1), 371–374. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2021.0061>

Tkachuk, R. V., Ilie, D., Robert, R., Kebande, V., & Tutschku, K. (2023). Towards efficient privacy and trust in decentralized blockchain-based peer-to-peer renewable energy marketplace. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 35, 101146. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101146>

Wang, S., Taha, A. F., Wang, J., Kvaternik, K., & Hahn, A. (2019). Energy Crowdsourcing and Peer-to-Peer Energy Trading in Blockchain-Enabled Smart Grids. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 49(8), 1612–1623. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2916565>

Zia, M. F., Benbouzid, M., Elbouchikhi, E., Muyeen, S. M., Techato, K., & Guerrero, J. M. (2020). Microgrid Transactive Energy: Review, Architectures, Distributed Ledger Technologies, and Market Analysis. *IEEE Access*, 8, 19410–19432. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968402>

# IMPACTO DE LA MORFOLOGÍA DEL VECINDARIO EN EL CLIMA TROPICAL: UN ESTUDIO DE CASO DE LOS BARRIOS TRADICIONALES DE KANYAKUMARI, INDIA

Recibido 25/03/2025  
Aceptado 30/05/2025

## IMPACT OF NEIGHBORHOOD MORPHOLOGY IN TROPICAL CLIMATES: A CASE STUDY OF THE TRADITIONAL NEIGHBORHOODS OF KANYAKUMARI, INDIA

## IMPACTO DA MORFOLOGIA DOS BAIRROS EM CLIMAS TROPICAIS: UM ESTUDO DE CASO DOS BAIRROS TRADICIONAIS DE KANYAKUMARI, ÍNDIA

### **Monika Shankar**

Master of Sustainable Architecture  
Department of Architecture, Research Scholar  
National Institute of Technology, Tiruchirappali, India  
<https://orcid.org/0000-0001-7147-1262>  
401122003@nitt.edu

### **Meenatchi Sundaram**

Doctor of Philosophy in Architecture and Planning  
Professor, Department of Architecture  
National Institute of Technology, Tiruchirappali, India  
<https://orcid.org/0000-0003-0709-8373>  
meenatchi@nitt.edu



## ABSTRACT

The morphology of the built environment interacts with the surrounding thermal environment. Thermal interactions affect a neighborhood's energy demand and thermal comfort. The extreme temperatures owing to climate change demand intervention reciprocating in urban heating. Thus, this study analyzed the thermal interaction between morphology and the thermal environment. The study was conducted in the tropical city of Kanyakumari, located in India. The influence of aspect ratio, sky view factor, green cover ratio, and building cover ratio on the Universal Thermal Climate Index was studied. A quantitative analysis of the morphological variables was conducted to establish a relationship with the comfort variable. The aspect and green cover ratios positively correlated with the climate index. In contrast, the sky view factor and building cover ratio had a negative relation with the index. However, when vegetation was introduced in the streets, the interaction between the aspect ratio and the index was reversed, where an increase in aspect ratio reduced the comfort in the canyon by introducing vegetation.

### Keywords

morphology, residential area, climate, tropical zones

## RESUMEN

La morfología del entorno construido interactúa con el ambiente térmico circundante. Las interacciones térmicas afectan la demanda energética y el confort térmico de un vecindario. Las temperaturas extremas debido al cambio climático exigen una intervención para reciprocitar la calefacción urbana. Por lo tanto, este estudio analizó la interacción térmica entre la morfología y el ambiente térmico. El estudio se llevó a cabo en la ciudad tropical de Kanyakumari, en la India. Se estudió la influencia de la relación de aspecto, el factor de vista del cielo, la relación de cubierta verde y la relación de cubierta edificada en el Índice Climático Térmico Universal. Se realizó un análisis cuantitativo de las variables morfológicas para establecer una relación con la variable de confort. Las relaciones de aspecto y cubierta verde se correlacionaron positivamente con el índice climático; por el contrario, el factor de vista del cielo y la relación de cubierta edificada tuvieron una relación negativa con el índice. Sin embargo, cuando se introdujo vegetación en las calles, la interacción entre la relación de aspecto y el índice se invirtió. Un aumento en la relación de aspecto redujo el confort en el cañón al introducir vegetación.

### Palabras clave

morfología, zona residencial, clima, zonas tropicales

## RESUMO

A morfologia do ambiente construído interage com o ambiente térmico circundante. As interações térmicas afetam a demanda energética e o conforto térmico de um bairro. As temperaturas extremas decorrentes das mudanças climáticas exigem intervenções que repercutem no aquecimento urbano. Assim, este estudo analisou a interação térmica entre a morfologia e o entorno térmico. O estudo foi realizado na cidade tropical de Kanyakumari, localizada na Índia. Foi estudada a influência da relação de aspecto, do fator de vista do céu, da relação de cobertura verde e da relação de cobertura dos edifícios no Índice Climático Térmico Universal. Realizou-se uma análise quantitativa das variáveis morfológicas para estabelecer uma relação com a variável de conforto. As proporções de aspecto e cobertura verde correlacionaram-se positivamente com o índice climático. Em contrapartida, o fator de vista do céu e a proporção de cobertura dos edifícios tiveram uma relação negativa com o índice. No entanto, com a introdução de vegetação nas ruas, a interação entre a proporção de aspecto e o índice foi invertida em áreas onde um aumento na relação de aspecto costumava reduzir o conforto no cânion.

### Palavras-chave:

morfologia, área residencial, clima, zonas tropicais

## INTRODUCCIÓN

Las ciudades indias están experimentando un desarrollo significativo y continuo. Actualmente, la preocupación clave en el diseño de las ciudades es mitigar el calentamiento urbano (Pattacini, 2012) y responder al cambio climático. Hay varios aspectos involucrados en esto. El balance de energía a nivel de las copas de los árboles determina el ambiente térmico resultante. La ganancia de calor a través de la radiación solar y los factores antropogénicos en ausencia de advección es igual a la pérdida de calor a través de la convección, la evaporación y el almacenamiento de calor. La geometría de cañón y las propiedades térmicas influyen en estos intercambios térmicos a nivel de las copas de los árboles (Oke, 1982). Por lo tanto, una geometría construida óptima y una configuración de superficie garantizan vecindarios sensibles al clima (Oke et al., 1991). Sin embargo, la configuración urbana determina la estrategia de mitigación. Por ende, la estrategia de diseño no puede generalizarse (Golany, 1996).

El confort térmico y la reducción de la temperatura del aire exterior son esenciales para desarrollar vecindarios sustentables (Emmanuel & Fernando, 2007). La morfología inmediata altera el microclima de un espacio abierto y su interacción con el ambiente interior. La morfología construida y el ambiente térmico son interdependientes. La Oficina de Eficiencia Energética identificó que la influencia de las temperaturas extremas combinada con el crecimiento económico aumentó la demanda de energía para lograr confort (Bureau of Energy Efficiency, 2023). Así, el diseño óptimo de la morfología del vecindario tiene como objetivo crear un ambiente confortable y reducir la demanda de energía.

Estudios anteriores analizaron críticamente el clima interior para reducir la demanda de energía y mejorar el confort y la calidad del aire, mientras que los estudios actuales destacan los entornos al aire libre para lo mismo (Shafaghat et al., 2016). Por lo tanto, un enfoque holístico es esencial para abordar los entornos interiores y exteriores, ya que tienen una relación recíproca.

En un estudio de entorno térmico, es necesario analizar la temperatura radiante media (MRT, en inglés) además de la temperatura del aire. El análisis de la MRT garantizará el confort (Emmanuel & Fernando, 2007). En consecuencia, es necesario considerar un parámetro de confort térmico que aborde el efecto de la radiación solar en el confort humano percibido.

Se han analizado los trópicos por su relación entre la geometría de las calles y el microclima. Sin embargo, hay menos estudios sobre las zonas costeras de los trópicos. De manera similar, no se ha discutido la variación del microclima interurbano (Shafaghat et al., 2016). Aunque los estudios abordan el clima tropical, las estrategias de diseño urbano no pueden generalizarse (Emmanuel & Fernando, 2007). Por tal razón, una medición *in situ* de los vecindarios de la ciudad garantizará un entorno construido sustentable.

El estudio de la morfología de su rendimiento térmico a menudo aborda configuraciones de edificios, calles y paisajes simultáneamente (Emmanuel & Johansson, 2006; Sun, 2011; Boukhabla et al., 2013; Tsoka et al., 2020). Los efectos positivos de la vegetación en el ambiente térmico son evidentes (Tsoka et al., 2017; Lassandro et al., 2019; Tsoka et al., 2020; Zhou et al., 2021). Por consiguiente, los estudios para optimizar edificios y calles son críticos para mejorar las condiciones térmicas. En este estudio, la morfología seleccionada reflejó la configuración del entorno construido a través de la relación de aspecto, el factor de visión del cielo, la relación de cobertura verde y la relación de cobertura del edificio. Aunque la relación de aspecto y el factor de visión del cielo transmiten el grado de cierre del cañón urbano, el estudio del factor de visión del cielo fue crucial, ya que se puede alterar fácilmente (Zhu et al., 2022).

Este estudio utilizó asentamientos tradicionales de casas pareadas en Kanyakumari como estudio de caso para explorar la relación entre las características morfológicas y el entorno térmico en un ambiente tropical. Se estudió el ambiente térmico utilizando variables de confort a escala de calle y barrio. La investigación identificó el diseño más efectivo para un vecindario sustentable a través del análisis estadístico en un contexto tropical.

El análisis se realizó en Nagercoil, una ciudad en Kanyakumari, India. Se ubica en 8.1° latitud norte y 77.4° longitud este. Las características culturales y geográficas influyeron en la evolución de la morfología construida de Kanyakumari. La ciudad se encuentra bajo un clima tropical húmedo y seco (Aw) según la Clasificación Köppen-Geiger y un clima cálido y húmedo según el Código Nacional de Construcción (NBC, 2016). La ciudad experimenta una temperatura media anual de 27,2°C, un mínimo de 23°C en febrero, y un máximo de 33,2°C en septiembre. El confort térmico adaptativo estuvo dentro del rango en la mayoría de los meses, excepto en abril (Figura 1a). La humedad relativa media anual fue del 78,54%, con un mínimo del 43% en febrero y un máximo del 99% en septiembre. Los niveles de humedad estuvieron principalmente por encima de la banda térmica (Figura 1b). El viento fluye predominantemente de oeste a este, alcanzando hasta 5 en la Escala de Beaufort (Figura 1e). Se puede observar un ligero movimiento del viento por debajo de 1,5 m/s desde todas las direcciones (Figura 1f). La ciudad experimenta cielos despejados entre enero y abril (Figura 1c). En abril, se observó estrés por calor el 97% de las veces (Figura 1d). La ausencia de nubosidad densa durante abril crea estrés térmico. Por lo tanto, este estudio abordó el mes con estrés térmico prolongado (Betti et al., 2024).

## METODOLOGÍA

El estudio apuntó a establecer una relación entre la morfología y el entorno térmico de Kanyakumari. Para el estudio se seleccionaron los barrios tradicionales de la ciudad. Estos vecindarios tenían casas pareadas orientadas al norte o al sur. Por ende, las calles principales estaban a lo



Figura 1. Perfil meteorológico de Kanyakumari. Source: Betti et al. (2024)

Tabla 1. Metodología. Fuente: Preparado por los autores.

Objetivo	Actividad	Resultado	Detalles
Identificar	Revisión de la literatura	Variables morfológicas	Relación de aspecto (H / W)
			Factor de visión del cielo (SVF)
			Relación de cobertura verde (GCR)
			Relación de cobertura del edificio (BCR)
		Variables de entorno térmico	Temperatura del aire 1,5 m
			Temperatura del globo
			Humedad relativa
			Movimiento del viento 1,5 m
	Estudio preliminar	Vecindarios	Kottar (N-1)
			Vadeeswaram (N-2)
Vadasery (N-3)			
Seleccionar	Vecindarios	Orientación	Calles este-oeste
		Relación de aspecto	Poco profundo (H/W < 1)
			Angosto (H/W > 1)
		GCR	GCR < 10
	GCR > 10		
Ambiente térmico	Variable de confort	Índice Universal de Clima Térmico (UTCI)	
Proceso	Medición en terreno	Temperatura del aire	Instrumento de medición climática Testo 440 y sonda de molinete de Ø 100 mm
		Temperatura del globo	Medidor de estrés por calor WBGT
		Humedad relativa	Medidor de estrés por calor WBGT
		Movimiento del viento	Instrumento de medición climática Testo 440 y sonda de molinete de Ø 100 mm
		Factor de visión del cielo	Aplicación Google Street View
Analizar	Estadísticas	Descriptivo	Diagrama de caja
			Gráficos de dispersión

largo del eje este-oeste. Las casas pareadas y la orientación norte-sur redujeron la ganancia de calor dentro de las casas (Shankar & Sundaram, 2023). Esta morfología expuso las calles a la intensa radiación solar. Tradicionalmente, estas calles tenían árboles, que luego fueron retirados para construir calles. Esto deterioró el ambiente térmico exterior. Este carácter de la morfología está presente solo en Vadasery (N-3). Así, comparar el entorno térmico en estos vecindarios garantizará una estrategia de diseño óptima para los barrios de Kanyakumari. La ciudad experimenta temperaturas moderadas del aire, alta humedad relativa y movimiento del viento. Los datos meteorológicos indican que las condiciones son ideales durante todo el año. Sin embargo, también se evidenció un malestar significativo durante abril. La intensa radiación solar provoca una ganancia de calor y debe abordarse.

Se realizó una investigación en terreno de tres barrios residenciales en abril de 2024 y se analizó cuantitativamente.

Las variables para el estudio se derivaron de la revisión bibliográfica. La relación de aspecto es la altura promedio dividida por el ancho de la calle en un punto de medición dado. El factor de visión del cielo es la porción del cielo visible con respecto al área total del cielo desde un punto específico. Estas son variables tridimensionales que representan la exposición del cañón a la radiación entrante y al movimiento del viento. En variables bidimensionales, la relación de cobertura verde es la fracción del área ajardinada con respecto al área total, mientras que la relación de cobertura del edificio es la proporción del área construida con respecto al área total. La cobertura verde altera el ambiente térmico a través del enfriamiento evaporativo y el sombreado. La fracción construida proporciona sombreado y la propiedad del material responde a la radiación entrante a través del calor almacenado y la radiación reflejada. Se analizó la influencia de la relación de aspecto, el factor de visión del cielo, la relación de cobertura verde y la relación de cobertura del edificio en el movimiento del Índice Universal

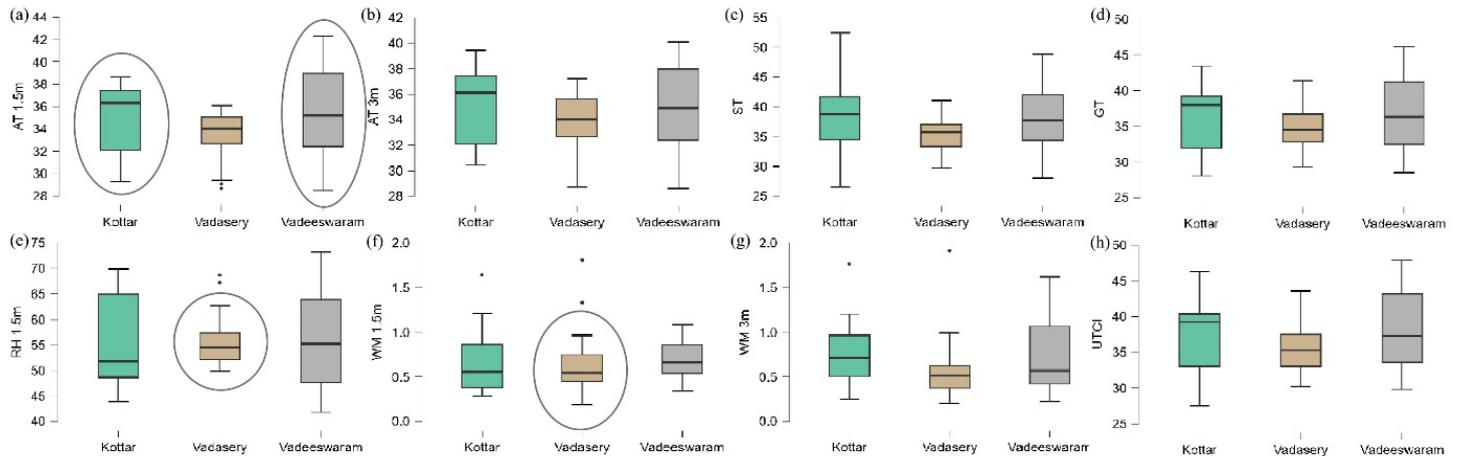


Figura 2. Perfil microclimático de los vecindarios. Fuente: Preparado por los autores.

de Clima Térmico. Las mediciones en terreno tomadas a 1,5 m y 3 m se utilizaron para calcular el UTCI. El perfil económico mixto del barrio residencial garantiza ganancias de calor similares a través de dispositivos y un mínimo movimiento vehicular. Por esto no se abordó el impacto del calor antropogénico. Un estudio previo no había encontrado diferencias significativas entre las relaciones de aspecto de 1, 2 y 3 (G. Chen et al., 2020). En consecuencia, las calles se dividieron en relaciones de aspecto de menos de uno y más de uno para el análisis. El flujo de trabajo del estudio se describe en la Tabla 1.

### MORFOLOGÍA DEL VECINDARIO

Los vecindarios se encuentran a 20 km tierra adentro del mar y rodeados de colinas. Los barrios fueron seleccionados en función de sus similitudes en la orientación de las calles. Los vecindarios seleccionados estaban 1,5 km al norte entre sí para garantizar condiciones climáticas similares. Las calles principales del barrio estaban alineadas en el eje este-oeste. Las intersecciones que las conectan estaban en dirección norte-sur. Con base en el carácter morfológico documentado, se dividieron en categorías las relaciones de aspecto y de cobertura verde. Las calles se usaban para secar granos de arroz e hilados en N-1 antes de un desarrollo extenso. Las calles de la N-2 son anchas para acomodar procesiones durante las fiestas. De ahí que el tamaño de la calle permitiera la radiación solar y la máxima afluencia. El carácter de la calle de la N-3 fue significativamente diferente de la N-1 y N-2 debido a los árboles en el centro de las calles. Los edificios en el vecindario eran casas pareadas modernas o tradicionales de dos o tres pisos con techos inclinados. Por tal razón, la altura del edificio oscilaba entre 5 y 9 metros y tenía una relación de aspecto máxima de tres.

### MEDICIÓN EN TERRENO

Abril experimenta una duración prolongada de estrés por calor. Por lo tanto, las mediciones en terreno se tomaron durante este período. Los datos se registraron entre las 6 am y las 6 pm cada tres horas. En total, se analizaron 12 puntos en la ciudad. Los vecindarios 1, 2 y 3 tenían cinco,

cuatro y tres puntos, respectivamente. Las mediciones se realizaron a 1,5 m para considerar el confort a nivel peatonal. El instrumento se aclimató para cada punto y se registró durante 5 minutos. En un análisis preliminar se analizó el radio de influencia de 30 m, 40 m y 50 m. Se encontró que el radio de influencia de 50 m era más efectivo. Los estudios anteriores analizaron 25 m, 50 m, 56 m, 75 m, 100 m, 125 m y 565 m y encontraron que un radio de influencia de 50 m era apropiado. (Krüger & Givoni, 2007; Jusuf & Hien, 2012). El vecindario fue mapeado para la relación de cobertura verde (GCR, en inglés), la relación de cobertura del edificio (BCR, en inglés) y la relación de espacio abierto (OSR, en inglés). Dado que la relación de espacios abiertos fue similar en todos los vecindarios, solo se analizaron GCR y BCR.

La temperatura del aire y el movimiento del viento se midieron a través del instrumento de medición climática Testo 440 con una sonda de molinete inalámbrica de 100 mm. La temperatura del globo y la humedad relativa se midieron usando el medidor TM-188d – Heat Stress WBGT. Después de procesar la imagen recopilada a través de la aplicación Google Street View, se calculó el factor de visión del cielo a partir de imágenes de ojo de pez usando RayMan Pro Versión 3.1 (Shankar & Marwaha, 2023). La temperatura radiante media (TRM, en inglés) se calculó usando la fórmula derivada de un globo negro de 40 mm (Vanos et al., 2021; Ouyang et al., 2022). La temperatura del aire, el movimiento del viento, la humedad relativa y la MRT se utilizaron para calcular UTCI desde su sitio web oficial.

## RESULTADO Y ANÁLISIS

Se realizó un análisis estadístico para comprender la relación entre las variables morfológicas y el ambiente térmico. El ambiente térmico se analizó mediante variables de microclima y una variable de confort. Las variables de microclima abordadas fueron la temperatura del aire, la temperatura del globo, el movimiento del viento y la humedad relativa. Para analizar el confort se utilizó el índice universal de clima térmico. El análisis se realizó en JASP (JASP Team, 2024).

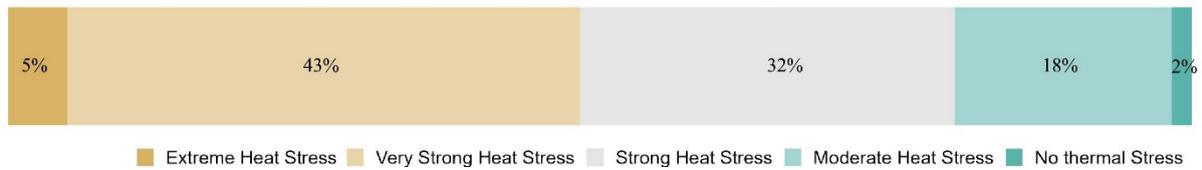


Figura 3. Distribución de la categoría UTCI en los vecindarios. Fuente: Preparado por los autores.

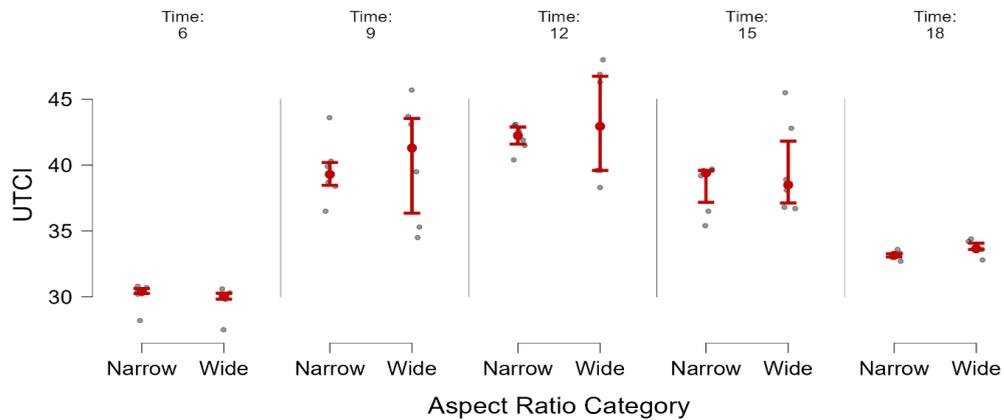


Figura 4. Impacto de la relación de aspecto. Fuente: Preparado por los autores.

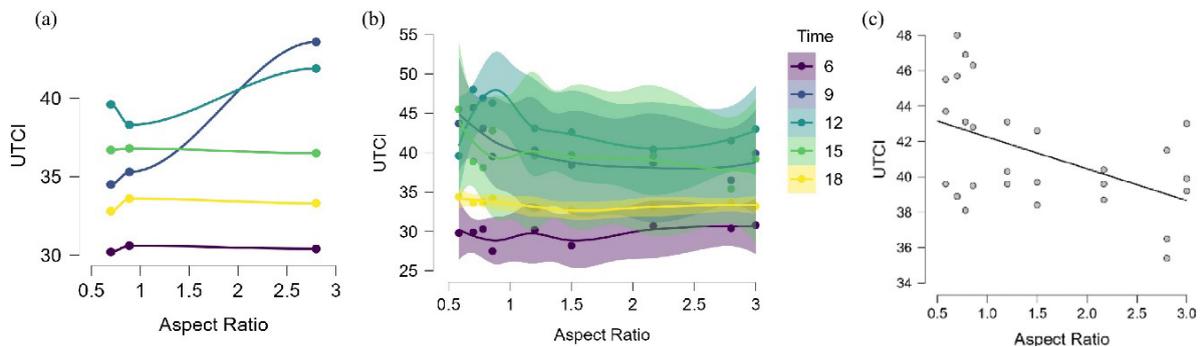


Figura 5. Datos de series temporales de relación de aspecto (a) N-3 (b) N-1 y N-2 (c) Correlación de Pearson para N-1 y N-2. Fuente: Preparado por los autores.

## EL VECINDARIO

Todos los vecindarios mostraron una tendencia similar para los parámetros de temperatura, como se observa en la Figura 2. N - 3 tuvo un rango térmico más bajo, mientras que N-1 y N-2 experimentaron las temperaturas más bajas y más altas (Figura 2a, b, c y d). En consecuencia, N-3 tuvo un mejor desempeño que los otros vecindarios. De manera similar, la humedad relativa tuvo un rango térmico más alto en N-1 y N-2, mientras que fue consistentemente más alta en N-3 (Figura 2e). El movimiento del viento fue comparativamente menor en N - 3 (Figura 2f). El UTCI medio sugirió que las condiciones de confort térmico eran mejores en N-3, seguidas de N-2 y N-1 (Figura 2h). Las categorías de UTCI se trazaron de acuerdo con su frecuencia en los vecindarios en la Figura 3. Se evidenció una diferencia significativa con respecto a los datos meteorológicos. En

contraste con los datos meteorológicos, los vecindarios experimentaron un estrés por calor muy fuerte del 43% en lugar del 28.6% (Figura 1), y la ciudad no experimentó estrés por calor extremo en los datos meteorológicos. Por ende, una medición *in situ* del vecindario considerará el ambiente térmico prevalente en los vecindarios de Kanyakumari (Figura 3).

## RELACIÓN DE ASPECTO

Las dos categorías de relación de aspecto se analizaron por su efecto en la variable de confort térmico. Los cañones anchos experimentaron un rango térmico mayor, mientras que los angostos tuvieron uno más pequeño. El UTCI fue más alto para cañones anchos que para cañones estrechos. Sin embargo, los datos de las 6:00 tuvieron UTCI más bajos para cañones anchos que para cañones estrechos.

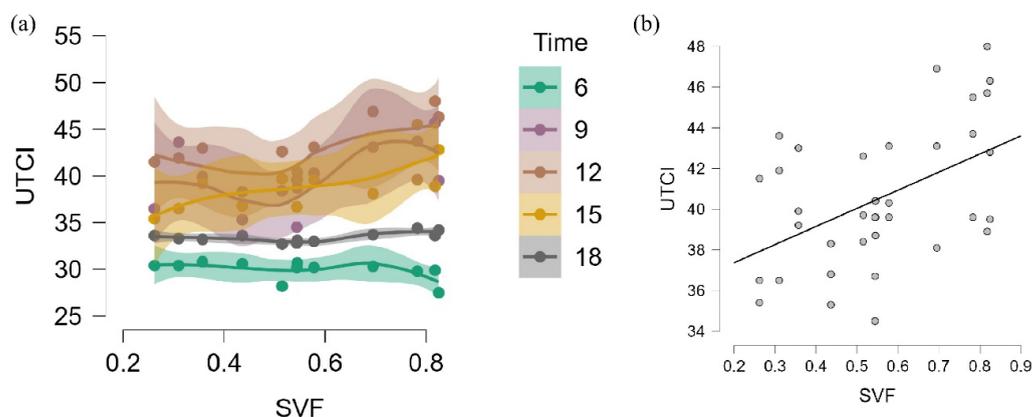


Figura 6. Datos de series temporales de todos los vecindarios y gráfico de correlación. Fuente: Preparado por los autores.

La mayor exposición en cañones anchos permitió un mejor ambiente térmico por la noche. En consecuencia, los cañones angostos se desempeñaron mejor que los cañones anchos durante el día (Figura 4).

Los valores continuos de la relación de aspecto se analizaron para derivar las tendencias (Figura 5). Dado que N-3 difería significativamente en su rango térmico y distribución, se analizó por separado (Figura 5a). Los gráficos de dispersión sugirieron una relación no lineal entre UTCI y la relación de aspecto. El gráfico sugirió un cambio mínimo en los datos de las 6:00 y las 18:00 con respecto a la relación de aspecto (Figura 5b). En N3, los datos de las 9:00 y las 12:00 resaltaron el aumento de temperatura con un aumento en la relación de aspecto. Simultáneamente, en N-1 y N-2, un aumento en la relación de aspecto disminuyó la temperatura durante las 9:00, 12:00 y 15:00. La relación contrastante de UTCI entre barrios se debió a la influencia de la vegetación. Una relación de aspecto más alta cambia la temperatura rápidamente debido al aumento de la exposición. Sin embargo, la presencia de vegetación en un cañón angosto captura el calor. Por esto, los cañones poco profundos eran ideales con vegetación, y los cañones angostos eran ideales sin vegetación intensiva en el cañón de la calle.

Los datos de las 6:00 y las 18:00 no mostraron una diferencia significativa. Por lo tanto, se realizó un análisis de correlación para las mediciones a las 9:00, 12:00 y 15:00. La correlación de Karl Pearson se realizó ya que el UTCI tenía un valor p de 0,269, superior a 0,05 para N-1 y N-2. La r de Pearson fue de -0,497 con un valor p de 0,008. Esto sugiere una relación negativa de  $(0.497^2)$  24,7%, y la hipótesis nula puede rechazarse a un nivel de significancia del 1%. Así, la relación de aspecto debería ser mayor para mejorar la comodidad en las calles durante el día. No obstante, el efecto significativo de la sombra de los árboles jugó el papel más crucial en la reducción de UTCI. Por ende, se puede lograr una mayor comodidad a través de la estructura del edificio o la sombra de la vegetación (Figura 5c).

## FACTOR DE VISIÓN DEL CIELO

Se analizó la relación entre SVF y UTCI para todos los barrios. Se puede observar un ligero aumento en UTCI entre las 9:00 y las 15:00. La Figura 6a muestra una reducción en UTCI entre 0,4 y 0,6 a las 9:00 y las 12:00. Además, no hubo cambios significativos en los datos de las 6:00 y las 18:00. Por lo tanto, los datos de la mañana y de la tarde se omitieron para un análisis adicional (Figura 6a). El UTCI se distribuyó normalmente con un valor p de 0,089. Se realizó la correlación de Pearson, una prueba paramétrica, ya que el valor p era mayor de 0,05. El análisis de correlación sugirió una r de Pearson de 0,489 con un valor p de 0,002. Por tal razón, hay un  $(0,489^2 = 0,239)$  23,9% de relación positiva con un nivel de significancia del 1%. El UTCI diurno aumentará con un aumento en el factor de visión del cielo (Figura 6b). Así, el factor de visión del cielo de más de 0,6 es perjudicial para el entorno térmico diurno.

## RELACIÓN DE COBERTURA VERDE

El índice de cobertura verde se analizó en base a dos categorías. La GCR superior al 10% tiene un aumento gradual en UTCI. Sin embargo, el aumento fue instantáneo cuando la GCR fue inferior al 10%. La temperatura máxima se experimentó al mediodía cuando la GCR era inferior al 10%. La temperatura nocturna fue ligeramente superior cuando la GCR fue superior al 10% (Figura 7). El rango térmico fue mayor en una mayor cobertura verde debido al calentamiento diferencial en el vecindario. Una mayor proporción de cobertura verde afectó positivamente el ambiente térmico diurno. La cobertura verde máxima estudiada en este análisis fue solo del 20%. Por lo tanto, es necesario analizar un índice de cobertura verde más alto.

Se analizó la relación entre la cobertura verde y el UTCI a lo largo del tiempo. Los datos de las 6:00 a las 18:00 no mostraron una tendencia significativa (Figura 8a). Sin embargo, los datos entre las 9:00 y las 15:00 mostraron una disminución en UTCI con un aumento en GCR (Figura 8b). Los datos de las 9:00 y las 12:00 siguieron máximos y

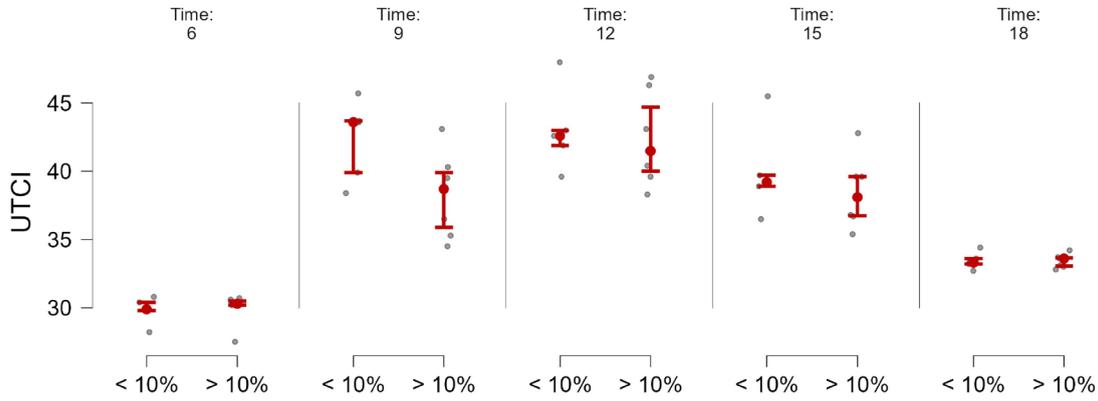


Figura 7. Impacto de la relación de cobertura verde. Fuente: Preparado por los autores.

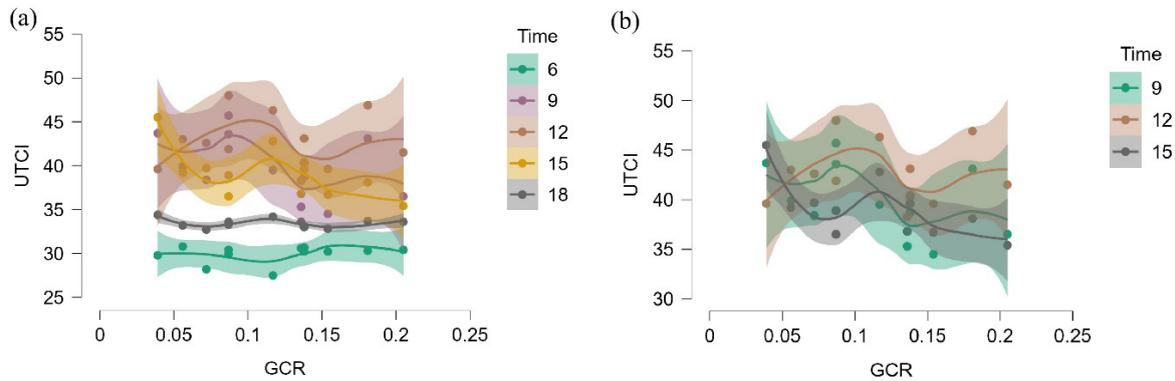


Figura 8. Datos de series temporales del vecindario (a) de 6:00 a 18:00, (b) 9:00 a 15:00. Fuente: Preparado por los autores.

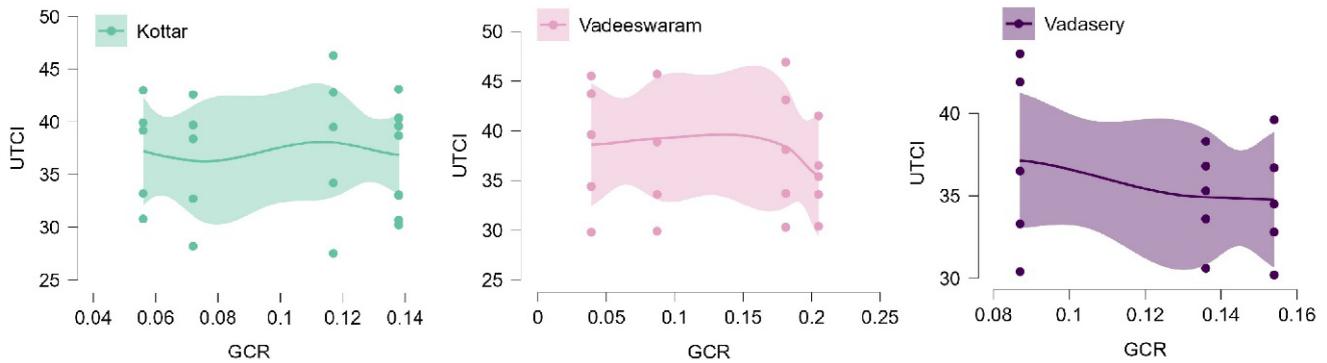


Figura 9. UTCI en los tres barrios N-1-Kottar, N-2-Vadeeswaram y N-3-Vadaseery. Fuente: Preparado por los autores.

mínimos similares. Mientras que a las 15:00, la reducción se retrasó con un aumento de GCR. Esto sugiere una retención de calor en áreas con vegetación más alta. La disminución de la temperatura es más prominente en N-3 (Figura 9). En consecuencia, la vegetación en el cañón de la calle condujo a una reducción en UTCI y mejoró significativamente el ambiente térmico debido a la sombra. Sin embargo, no se estableció una correlación entre GCR y UTCI.

### RELACIÓN DE COBERTURA DEL EDIFICIO

Se analizó la relación entre BCR y UTCI. El análisis no incluyó los datos de las 6:00 y las 18:00, ya que no existía una tendencia significativa (Figura 10a). El aumento en UTCI con un aumento en BCR se estableció en la Figura 10(b). El UTCI se distribuyó normalmente. Por ende, se realizó una correlación  $r$  de Pearson en los datos recopilados entre las 9:00 y las 15:00. El valor de la  $r$  de Pearson fue de 0,422, con un valor  $p$  de 0,010. Así, BCR y UTCI tienen una relación

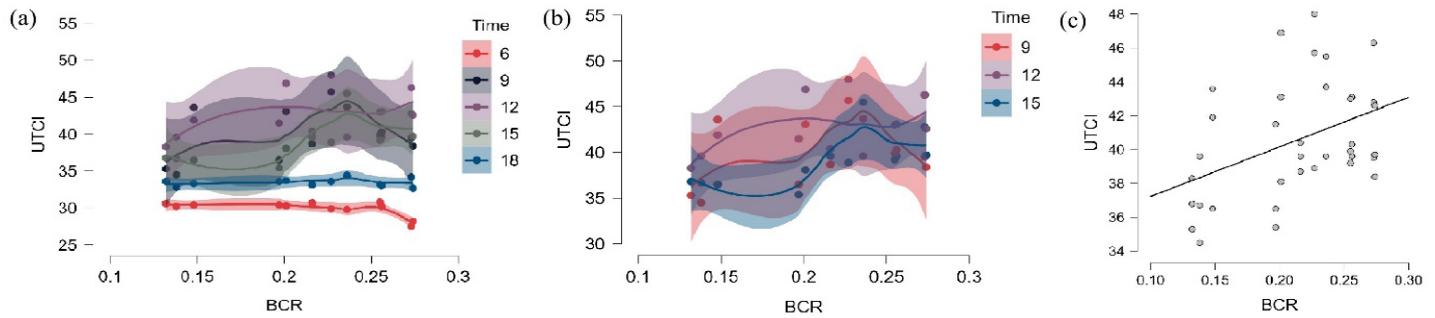


Figura 10. Datos de series temporales y correlación entre BCR y UTCI. Fuente: Preparado por los autores.

positiva del 17,8% y pueden rechazar la hipótesis nula a un nivel de significancia del 5%. Por lo tanto, una fracción aumentada del entorno construido deteriorará el entorno térmico diurno. Aunque BCR, GCR y OSR son tres segmentos de un todo, el BCR estableció una correlación significativa con el UTCI en lugar del GCR (Figura 10c).

## CONCLUSIÓN

Se analizó la geometría del vecindario para abordar el estrés por calor del verano en Kanyakumari. Se estableció la influencia de la relación de aspecto, el factor de visión del cielo, la relación de cobertura verde y la relación de cobertura del edificio en el Índice Universal de Clima Térmico. Un aumento en la relación de aspecto aumenta la comodidad durante el día, como se observó en un estudio similar realizado en ciudades tropicales (De & Mukherjee, 2018; Sharmin et al., 2019; Jamei et al., 2020). Este caso fue válido en ausencia de vegetación. Sin embargo, la vegetación en el vecindario tuvo un efecto inverso en el confort térmico. Un aumento en la relación de aspecto disminuyó el confort térmico cuando el cañón de la calle tenía vegetación. Esto se alinea con el estudio realizado en la zona costera de Sri Lanka (Emmanuel & Johansson, 2006). Además, se observó una reducción en el movimiento del viento cuando se introdujo la vegetación. Por ende, un estudio sugirió que la vegetación no debería obstaculizar el movimiento del viento para proporcionar sombra (S. Chen et al., 2020). El factor de visión del cielo tuvo una relación positiva con la variable confort. Un aumento en la FVS condujo a un aumento en las variables de temperatura diurna. Esto se alinea con el estudio realizado en condiciones climáticas similares (Sharmin et al., 2019; Yu et al., 2020). El efecto de mejora de la vegetación se estableció ya que el efecto de sombreado de la vegetación jugó un papel importante en el logro de la comodidad, similar a otros estudios (Johansson et al., 2004; Sun, 2011). Un aumento en la cobertura del edificio reduce el confort térmico. En consecuencia, un estudio similar recomendó edificios altos escasamente espaciados (De & Mukherjee, 2018).

Este estudio intentó comprender la interacción térmica entre la morfología 2D y 3D y el entorno circundante en Kanyakumari. El estudio tenía como objetivo reducir el estrés por calor que experimenta una ciudad costera en un clima tropical. Finalmente, se descubrió que el sombreado

contribuía significativamente a lograr el confort térmico. Se descubrió que una relación de aspecto y GCR más altas, así como un SVF y BCR más bajos, eran ideales para desarrollar un vecindario sostenible. Adicionalmente, el impacto se revierte cuando se introduce vegetación en la morfología. Así, se recomiendan relaciones de aspecto más bajas cuando se introducen árboles en el cañón de la calle. En este estudio no se analizó el efecto de la orientación. Además, se evitó la influencia del calor antropogénico. Por tal razón, los estudios futuros deberían abordar el impacto de la orientación y el calor antropogénico.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES CRediT

Conceptualización, M.S.; Curación de Datos, M.S.; Análisis Formal, M.S.; Adquisición de Financiación; Investigación, M.S.; Metodología, M.S. y A.M.S.; Administración de Proyectos, A.M.S.; Recursos, M.S.; Software, M. S.; Supervisión, A.M.S.; Validación, M.S.; Visualización, M.S.; Escritura-borrador original, M.S.; Escritura-revisión y edición; Escritura-revisión y edición, A.M.S.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Betti, G., Tartarini, F., Nguyen, C., & Schiavon, S. (2024). CBE Clima Tool: a free and open-source web application for climate analysis tailored to sustainable building design. *Building Simulation*, 17(3), 493-5008. <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1090-5>
- Boukhabla, M., Alkama, D., & Bouchair, A. (2013). The effect of urban morphology on urban heat island in the city of Biskra in Algeria. *International Journal of Ambient Energy*, 34(2), 100–110. <https://doi.org/10.1080/01430750.2012.740424>
- Bureau of Energy Efficiency. (2023). *Impact of Energy Efficiency Measures For The Year 2021-22*. <https://udit.beeindia.gov.in/wp-content/uploads/2024/02/Impact-Assessment-Report-2021-22-1.pdf>
- Chen, G., Wang, D., Wang, Q., Li, Y., Wang, X., Hang, J., Gao, P., Ou, C., & Wang, K. (2020). Scaled outdoor experimental studies of urban thermal environment in street canyon models

- with various aspect ratios and thermal storage. *Science of the Total Environment*, 726, 138147. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138147>
- Chen, S., Zhang, W., Hien, N., & Ignatius, M. (2020). Combining CityGML files and data-driven models for microclimate simulations in a tropical city. *Building and Environment*, 185, 107314. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107314>
- De, B., & Mukherjee, M. (2018). "Optimisation of canyon orientation and aspect ratio in warm-humid climate: Case of Rajarhat Newtown, India". *Urban Climate*, 24, 887–920. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.11.003>
- Emmanuel, R., & Fernando, H. J. S. (2007). Urban heat islands in humid and arid climates: Role of urban form and thermal properties in Colombo, Sri Lanka, and Phoenix, USA. *Climate Research*, 34, 241–251. <https://doi.org/10.3354/cr00694>
- Emmanuel, R., & Johansson, E. (2006). Influence of urban morphology and sea breeze on hot humid microclimate: The case of Colombo, Sri Lanka. *Climate Research*, 30, 189–200. <https://doi.org/10.3354/cr030189>
- Golany, G. S. (1996). Urban design morphology and thermal performance. *Atmospheric Environment*, 30(3), 455–465. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00266-9](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00266-9)
- Jamei, E., Ossen, D. R., Seyedmahmoudian, M., Sandanayake, M., Stojcevski, A., & Horan, B. (2020). Urban design parameters for heat mitigation in tropics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110362. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110362>
- JASP Team. (2024). *JASP (Version 0.19.2)* [Computer software]. <https://jasp-stats.org/>
- Johansson, E., Emmanuel, R., & Rosenlund, H. (September 19–22 2004). *Microclimate and thermal comfort in the warm humid city of Colombo, Sri Lanka*. Plea2004 - The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, The Netherlands. <https://alexandria.tue.nl/openaccess/635611/p0661final.pdf>
- Jusuf, S. K., & Hien, W. N. (2012). Development of empirical models for an estate-level air temperature prediction in Singapore. *Journal of Heat Island Institute International*, 7-2, 111-125. [https://heat-island.jp/web\\_journal/HI2009Conf/pdf/15.pdf](https://heat-island.jp/web_journal/HI2009Conf/pdf/15.pdf)
- Krüger, E., & Givoni, B. (2007). Outdoor measurements and temperature comparisons of seven monitoring stations: Preliminary studies in Curitiba, Brazil. *Building and Environment*, 42(4), 1685–1698. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.02.019>
- Lassandro, P., Di Turi, S., & Zaccaro, S. A. (2019). Mitigation of rising urban temperatures starting from historic and modern street canyons towards zero energy settlement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 609(7), 072036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/609/7/072036>
- NBC. (2016). *National Building Code of India 2016 Volumen 2*. Bureau of Indian Standards. <https://dn790000.ca.archive.org/0/items/nationalbuilding02/in.gov.nbc.2016.vol2.digital.pdf>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T. R., Johnson, G. T., Steyn, D. G., & Watson, I. D. (1991). Simulation of surface urban heat islands under "ideal" conditions at night, part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology*, 56, 339–358. <https://doi.org/10.1007/BF00119211>
- Ouyang, W., Liu, Z., Lau, K., Shi, Y., & Ng, E. (2022). Comparing different recalibrated methods for estimating mean radiant temperature in outdoor environment. *Building and Environment*, 216, 109004. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109004>
- Pattacini, L. (2012). Climate and urban form. *Urban Design International*, 17, 106–114. <https://doi.org/10.1057/udi.2012.2>
- Shafaghat, A., Manteghi, G., Keyvanfar, A., Bin Lamit, H., Saito, K., & Ossen, D. R. (2016). Street geometry factors influence urban microclimate in tropical coastal cities: A review. *Environmental and Climate Technologies*, 17(1), 61–75. <https://doi.org/10.1515/rtuct-2016-0006>
- Shankar, M., & Marwaha, B. M. (2023). Impact of courtyard on indoor thermal environment in vernacular row houses of warm and humid climate: case study of Kanyakumari, Tamil Nadu. *Advances in Building Energy Research*, 17(6), 653–678. <https://doi.org/10.1080/17512549.2023.2290529>
- Shankar, M., & Sundaram, A. M. (2023). Efficient and optimum design of native architecture – A means for sustainability. Case study of Residential Units in Kottar, Kanyakumari. *Energy & Buildings*, 298, 113586. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113586>
- Sharmin, T., Steemers, K., & Humphreys, M. (2019). Outdoor thermal comfort and summer PET range: A field study in tropical city Dhaka. *Energy and Buildings*, 198, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.064>
- Sun, C. Y. (2011). A street thermal environment study in summer by the mobile transect technique. *Theoretical and Applied Climatology*, 106, 433–442. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0444-6>
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, K., & Theodosiou, T. (2017). Urban space's morphology and microclimatic analysis: A study for a typical urban district in the Mediterranean city of Thessaloniki, Greece. *Energy and Buildings*, 156, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.066>
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, K., Theodosiou, T., & Bikas, D. (2020). Assessing the effect of the urban morphology on the ambient air temperature of urban street canyons under different meteorological conditions. Application in residential areas of Thessaloniki, Greece. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 410, 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012005>
- Vanos, J. K., Rykaczewski, K., Middel, A., Vecellio, D. J., Brown, R. D., & Gillespie, T. J. (2021). Improved methods for estimating mean radiant temperature in hot and sunny outdoor settings. *International Journal of Biometeorology*, 65, 967–983. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02131-y>

Yu, Z., Chen, S., Wong, N. H., Ignatius, M., Deng, J., He, Y., & Hii, D. J. C. (2020). Dependence between urban morphology and outdoor air temperature: A tropical campus study using random forests algorithm. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102200. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102200>

Zhou, H., Tao, G., Yan, X., & Sun, J. (2021). Influences of greening and structures on urban thermal environments: A case study in Xuzhou City, China. *Urban Forestry and Urban Greening*, 66, 127386. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127386>

Zhu, S., Chen, M., Lu, S., & Mai, X. (2022). Influence of Urban Geometry on Thermal Environment of Urban Street Canyons in Hong Kong. *Buildings*, 12(11), 1836. <https://doi.org/10.3390/buildings12111836>

# EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO EXTERIOR EN KAMPUNGS URBANOS DE ALTA DENSIDAD EN TAMANSARI, BANDUNG: UN ESTUDIO DE SIMULACIÓN DEL MICROCLIMA

Recibido 03/03/2025  
Aceptado 29/05/2025

## ASSESSING OUTDOOR THERMAL COMFORT IN HIGH-DENSITY URBAN KAMPUNGS IN TAMANSARI, BANDUNG: A MICROCLIMATE SIMULATION STUDY

## AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO AO AR LIVRE EM KAMPUNGS URBANOS DE ALTA DENSIDADE EM TAMANSARI, BANDUNG: UM ESTUDO DE SIMULAÇÃO DO MICROCLIMA

### **Reinaldi Primanizar**

Master of Architecture  
Lecturer Architecture  
President University, Bekasi, Indonesia  
<https://orcid.org/0009-0008-4802-2686>  
[reinaldi.primanizar@president.ac.id](mailto:reinaldi.primanizar@president.ac.id)

### **Suhendri Suhendri**

Doctor of Philosophy  
Lecturer, School of Architecture, Planning, and Policy Development  
Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia  
<https://orcid.org/0000-0001-6042-2051>  
[suhendri91@itb.ac.id](mailto:suhendri91@itb.ac.id)

### **Dibya Kusyala**

PhD in Building Technology  
Lecturer, Housing and Settlement Design and Research Group  
Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia  
[dibja@itb.ac.id](mailto:dibja@itb.ac.id)



## ABSTRACT

Urban kampungs, characterized by dense, organically developed settlements, present unique challenges in outdoor thermal comfort. This study investigates how key physical variables—building arrangement, surface materials, and vegetation—impact the microclimate of outdoor spaces in Tamansari, Bandung, using ENVI-met 4 simulations. The findings reveal that material reflectivity significantly influences air temperature, with lower-albedo paving proving more effective in reducing heat accumulation. Compact building arrangements with a high height-to-width ratio provide essential shading, mitigating heat stress, while strategically placed vegetation enhances shading and wind flow, contributing to improved thermal comfort. These insights offer valuable guidelines for architects and urban planners designing climate-responsive, high-density urban environments. The study underscores the importance of integrating passive cooling strategies to improve outdoor livability in urban kampungs, especially in tropical climates.

### Keywords

urban kampung, outdoor thermal comfort, performance simulation, ENVI-met, high-density settlement

## RESUMEN

Los asentamientos urbanos, caracterizados por asentamientos densos y desarrollados orgánicamente, presentan desafíos únicos para lograr el confort térmico al aire libre. Este estudio investiga cómo las variables físicas clave (disposición de los edificios, materiales de la superficie y vegetación) afectan el microclima de los espacios al aire libre en Tamansari, Bandung, utilizando simulaciones ENVI-met 4. Los hallazgos revelan que la reflectividad del material influye significativamente en la temperatura del aire, y que los pavimentos con un albedo más bajo resultan más efectivos para reducir la acumulación de calor. Las disposiciones de edificios compactos con una alta relación altura-ancho brindan un sombreado esencial, mitigando el estrés térmico, mientras que la vegetación ubicada estratégicamente mejora tanto el sombreado como el flujo del viento, lo que contribuye a mejorar el confort térmico. Estos conocimientos ofrecen pautas valiosas para los arquitectos y planificadores urbanos que buscan diseñar entornos urbanos de alta densidad que respondan al clima. El estudio resalta la importancia de integrar estrategias de refrigeración pasiva para mejorar la habitabilidad al aire libre en los kampungs urbanos, particularmente en climas tropicales.

### Palabras clave

asentamiento urbano, confort térmico al aire libre, simulación de rendimiento, ENVI-met, asentamiento de alta densidad

## RESUMO

Os assentamentos urbanos, caracterizados por assentamentos densos e desenvolvidos organicamente, apresentam desafios únicos em termos de conforto térmico ao ar livre. Este estudo investiga como variáveis físicas importantes — disposição dos edifícios, materiais de superfície e vegetação — afetam o microclima dos espaços ao ar livre em Tamansari, Bandung, utilizando simulações ENVI-met 4. Os resultados revelam que a refletividade dos materiais influencia significativamente a temperatura do ar, com pavimentos de baixo albedo se mostrando mais eficazes na redução do acúmulo de calor. O arranjo compacto dos edifícios, com uma alta relação altura/largura, proporciona sombreamento essencial, mitigando o estresse térmico, enquanto a vegetação estrategicamente posicionada aumenta o sombreamento e o fluxo de vento, contribuindo para melhorar o conforto térmico. Essas informações oferecem diretrizes valiosas para arquitetos e urbanistas que projetam ambientes urbanos de alta densidade e que respondem às mudanças climáticas. O estudo ressalta a importância de integrar estratégias de resfriamento passivo para melhorar a habitabilidade ao ar livre em kampungs urbanos, especialmente em climas tropicais.

### Palavras-chave:

assentamentos urbano, conforto térmico ao ar livre, simulação de desempenho, ENVI-met, assentamento de alta densidade

## INTRODUCCIÓN

Los arquitectos y urbanistas, para hacer frente a las preocupaciones de la población con respecto al medio ambiente y el cambio climático, ahora están considerando el microclima urbano en sus limitaciones de planificación, especialmente la intervención de espacios al aire libre. En las áreas urbanas, particularmente en los kampungs urbanos, los espacios al aire libre son esenciales para mantener los hábitats porque albergan peatones, ciclistas y diversas actividades al aire libre para contribuir a la habitabilidad urbana (Johansson y Emmanuel, 2006). Los estudios han demostrado que la morfología urbana, incluidas la orientación de las calles y la configuración de los edificios, impacta directamente en el confort térmico al aire libre al regular la exposición a la radiación solar y la circulación del viento (Taleghani et al., 2014).

Los kampungs urbanos son asentamientos que existieron mucho antes de que surgiera la planificación urbana formal. Desarrollados de manera informal, destacan por tener características tradicionales y estructuras irregulares, mientras que la cobertura de edificios pequeños, la disposición densa de masas, los callejones estrechos y el desarrollo orgánico son características de las casas urbanas del kampung. El concepto de kampungs surgió debido al crecimiento familiar en un área con tierras limitadas y problemas económicos (Asriana et al., 2024; Hamidah et al., 2017; Rochmania y Sukmawati, 2024). Son comunes en la mayoría de las ciudades desarrolladas del sudeste asiático, como Yakarta, Bandung, Bangkok y Manila. Observaciones iniciales en el caso estudiado aquí, el kampung urbano de Tamansari, Bandung, muestra muchas actividades sociales dentro de casas muy poco espaciadas, con niños jugando en la calle y pequeñas plazas alrededor de las casas. En un entorno de espacios reducidos, tipología al aire libre, calles estrechas y plazas pequeñas, se intensifica la actividad íntima al aire libre entre los habitantes. Este sentido de comunidad es un aspecto social valioso de los asentamientos urbanos de kampung, que contribuye a la resiliencia social en la ciudad. Por ende, mejorar los espacios comunitarios al aire libre apoyaría la cohesión social y elevaría la habitabilidad general del kampung urbano.

El tiempo que los habitantes pasan en espacios al aire libre a menudo refleja su satisfacción subjetiva con el nivel de confort térmico. La percepción de comodidad de las personas no está impulsada solamente por mediciones físicas como la temperatura y la humedad, sino también por factores fisiológicos y culturales (Nikolopoulou y Steemers, 2003). Por ejemplo, en los asentamientos urbanos de kampung, la aceptación de diferentes condiciones térmicas puede ser mayor debido a la aceptación social de la vida al aire libre. Por lo tanto, este estudio explora cómo las áreas sombreadas, la ventilación natural y los elementos verdes pueden mejorar significativamente el confort térmico percibido por los habitantes y fomentar una mayor actividad al aire libre, incluso en climas cálidos.

La gente espera diferentes experiencias de confort térmico en espacios interiores y exteriores. Sus expectativas varían según las circunstancias de exposición, como las variantes de sol y sombra, la velocidad y dirección del viento, los cambios en la tasa de humedad, la radiación directa e indirecta, etc. (Givoni et al., 2003; Wang y Su, 2025). El entorno externo afecta significativamente la forma en que vive la gente, y está determinado por las condiciones

naturales, los factores antropogénicos, la densidad de la construcción urbana, el tamaño de las áreas de vegetación, etc. (Klemm, 2007). Mejorar el confort térmico al aire libre también puede afectar la salud y el bienestar, promover la actividad física y aumentar las interacciones sociales (ABAA, 2020; van den Bosch y Ode Sang, 2017).

Los investigadores han estudiado ampliamente las condiciones de confort térmico en entornos urbanos. Liu descubrió que en los últimos 23 años, ha habido 632 artículos en Web of Science y Scopus que usan una palabra clave similar (Liu et al., 2023; Mandić et al., 2024). Sin embargo, se ha prestado poca atención a los asentamientos informales de alta densidad caracterizados por kampungs urbanos. Este estudio busca abordar esta brecha simulando el confort térmico al aire libre en kampungs urbanos y definiendo el papel de sus condiciones físicas únicas. Al modelar el sitio con una comprensión de los arreglos de construcción existentes, el material de la superficie y la vegetación, este estudio tiene como objetivo proporcionar información sobre la optimización de los espacios al aire libre en asentamientos de alta densidad. Los hallazgos podrían ofrecer pautas valiosas para que los urbanistas creen un mejor confort térmico y bienestar en los kampungs urbanos.

## MICROCLIMA DE CONFORT TÉRMICO

Esta sección describe el enfoque para mejorar las condiciones de confort térmico al aire libre en entornos urbanos. Los parámetros físicos incluyen factores ambientales como la temperatura radiante media (MRT, en inglés), la temperatura del aire, la velocidad del viento y la humedad relativa. Estudios recientes enfatizan que, en asentamientos urbanos de alta densidad, la MRT juega un papel fundamental en la determinación de la sensación térmica, en comparación con la temperatura del aire por sí sola. En entornos compactos como los kampungs urbanos, las calles estrechas, las densas masas de edificios y la vegetación limitada amplifican la radiación solar, aumentando la MRT y provocando un mayor estrés térmico incluso con temperaturas moderadas del aire. Además, la investigación de Gallardo et al. (2016) destaca que incluso pequeños aumentos en la ventilación natural pueden mejorar significativamente el confort térmico percibido en climas cálidos y húmedos. Las velocidades del viento de solo 0,3-1,0 m/s también mejoran la percepción del confort cuando se combinan con estrategias de sombreado o enfriamiento de la superficie. La investigación ha demostrado que la intervención física afecta los microclimas urbanos y que estos cambios en el entorno urbano dan como resultado el confort térmico. Para mejorar el confort térmico, los habitantes pueden ajustar factores físicos como la disposición de las construcciones, los materiales, la vegetación y las características del agua (Cheng et al., 2022; Liao et al., 2024; Pamungkas et al., 2024; Rodríguez et al., 2025; Uno et al., 2018; Zhang et al., 2025). En la siguiente sección se explica cómo este factor disminuye el estrés térmico de los habitantes en los microclimas.

## DISPOSICIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES

En bloques de edificios, las superficies de los callejones reciben radiación solar, lo que influye en las atmósferas térmicas exteriores y afecta la sensibilidad térmica de un callejón. Sin embargo, hay diferencias significativas entre

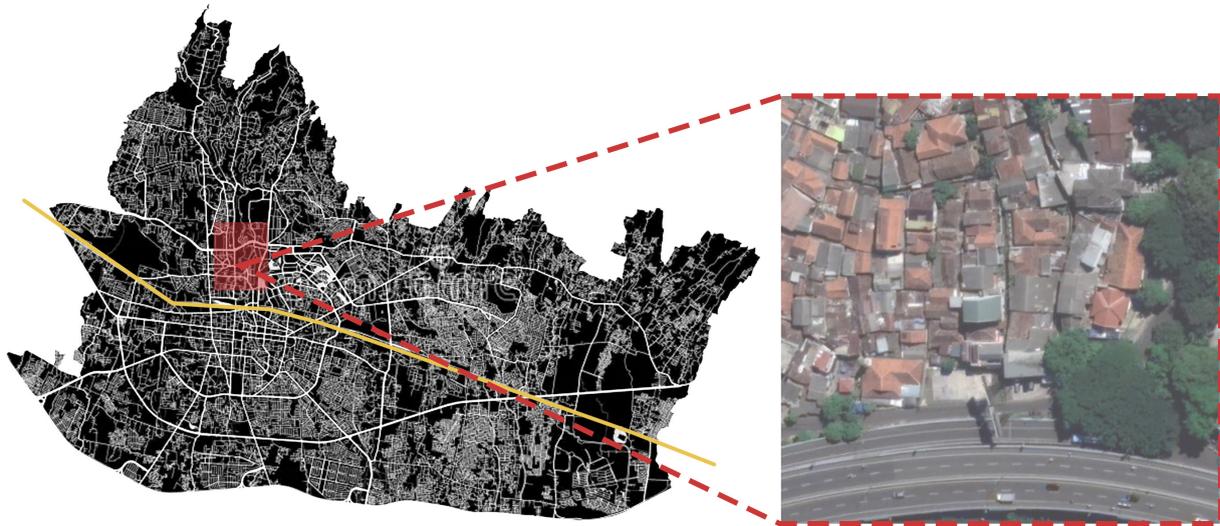


Figura 1. Ubicación de la evaluación, Kampung Tamansari, Bandung. Fuentes: Google Earth, modificado por los autores.

los valores de sensación de confort térmico humano en zonas soleadas y sombreadas debido a la radiación solar (Aleksandrowicz y Cortador de Perlas, 2023; Kim et al., 2024; Murakami, 2006).

Shashua-Bar y Hoffman (2000) introdujeron la “relación de espaciamento” (distancia de los edificios paralela a la calle/ longitud del edificio paralela a la orientación de la calle) para cuantificar la forma separada. Esto sigue el patrón básico de forma de la calle y los indicadores morfológicos. Los estudios han abordado el índice de acceso solar de los cañones de las calles, como en el espacio negativo de la kampung urbana, utilizando relaciones H/W en valores variables con orientación de la calle E-O y N-S (Arnfield, 1990). Estos indicadores fundamentales se utilizaron para configurar el estudio de caso con orientaciones H/W de 0.5, 1, 2, 4 y E-O, N-S, NE-SO y NO-SE (Ali-Toudert y Mayer, 2006).

Las distribuciones de presión inducidas por el viento son otro aspecto de la disposición de los edificios. Estos dependen de muchos factores en el entorno urbano, como la condición del flujo de aproximación, la dirección del viento, la geometría de la estructura urbana y el entorno urbano (Montazeri y Bloqueo, 2013; Setaih et al., 2013).

### Material de la superficie

El uso de materiales menos absorbentes (alto albedo) es una técnica práctica y prometedora para reducir el efecto del entorno térmico en la comodidad de los peatones. Las superficies de alto albedo reflejan una mayor parte de la radiación solar entrante, reduciendo así la cantidad absorbida y almacenada como calor en entornos urbanos. Se caracteriza por la capacidad de las superficies ambientales para absorber la radiación solar entrante en entornos urbanos (Akbari et al., 1992; Baniassadi et al., 2018; Fintikakis et al., 2011). Por otro lado, las superficies blancas y de colores más claros pueden mejorar el confort térmico al reducir la temperatura ambiente. La evidencia de la investigación ha indicado que aumentar la reflectancia solar de los materiales

en 0,25 reduce significativamente la temperatura del material en 10°C, ya que mantiene las superficies estructurales más frías bajo el sol, reduciendo así la convección de calor del material al aire ambiente (Akbari et al., 2001; Setaih et al., 2013; Synnefa et al., 2011). Si bien el principio sigue siendo válido en regiones tropicales como Bandung, los estudios empíricos sugieren que las reducciones de temperatura debidas a las mejoras del albedo pueden moderarse ligeramente debido a la humedad basal consistentemente alta y los efectos difusos de la radiación (Benrazaví et al., 2016; Liu et al., 2023).

### Vegetación

Uno de los métodos más comunes y efectivos para mejorar el confort térmico de los peatones al aire libre en espacios urbanos es plantar vegetación y árboles en los espacios abiertos disponibles. Tal intervención puede disminuir la ganancia de calor del sol, proporcionando enfriamiento tanto a través de la sombra como de la evapotranspiración (Dimoudi y Nikolopoulou, 2003). Estudios empíricos han demostrado el fuerte papel de la vegetación en la modificación de los microclimas urbanos. Por ejemplo, Picot (2004) observó que los parques urbanos en climas cálidos reducen la temperatura del aire local hasta en 2 a 3 °C en comparación con las áreas urbanizadas adyacentes. Del mismo modo, Mahmoud (2011) informó que las áreas sombreadas debajo de las copas de los árboles exhibían una temperatura radiante media (MRT) más baja que los espacios sin sombra.

La gran ventaja de la cobertura arbórea es el efecto refrescante del impacto conjunto de la evapotranspiración (ET) y la sombra de las copas (Kim y Lee, 2024; Kim et al., 2024; Shashua-Bar y Hoffman, 2000). Más allá de su papel estético y su agradable percepción natural, aumentar la vegetación en las áreas urbanas representa una técnica de mitigación significativa, ya que ayuda a reducir el estrés por calor, bloquea el ruido, mejora la calidad del aire y protege a las personas del viento, lo que lo convierte en



Figura 2. Situación actual en kampung en Tamansari. Esto muestra la altura típica de un edificio y el ancho de la calle. El asentamiento (arriba) en el interior tiene una alta relación H/W, y el perímetro (abajo) tiene una baja relación H/W. Fuentes: Fotografías tomadas por los autores.

un componente esencial del diseño urbano resistente al clima (Fintikakis et al., 2011; Liu et al., 2023). Estudios de simulación recientes revelan que la efectividad del enfriamiento de la vegetación depende en gran medida de la geometría del corredor. En cañones con relaciones H/W más altas, el impacto de la sombra de los árboles se vuelve más pronunciado, lo que mejora las reducciones tanto en la temperatura del aire como en la MRT. En su simulación, la vegetación es más efectiva para corredores con orientación O-E que otras orientaciones (Liu et al., 2023; Suryantara et al., 2019).

## METODOLOGÍA

El estudio de caso se realizó en Tamansari (Figura 1), un kampung urbano ubicado en Bandung, Indonesia (6°53 '50.5" S 107°36 '31.2" E). Bandung cubre un área total de 16.729,65 hectáreas y tiene una población de 2.579.837 personas en 2023, lo que la convierte en una de las ciudades más densamente pobladas de Indonesia, con una densidad de 15.051 personas/km<sup>2</sup>. Tamansari ejemplifica las características morfológicas de los kampung urbanos en el sudeste asiático, donde los espacios al aire libre expresan innegablemente diversas interacciones sociales (Figura 2).

El efecto de las características exteriores en el confort térmico se analiza mediante una simulación del microclima utilizando el software ENVI-met 4. Es importante señalar que este estudio no utilizó un modelo calibrado. No se incorporaron datos medidos en terreno con fines de calibración o validación. En cambio, el modelo de simulación utiliza condiciones meteorológicas constantes establecidas manualmente en función de los datos climatológicos locales.

El dominio de simulación seleccionado es de 60 m (x) x 60 m (y) x 15 m (z), con una resolución espacial de 1 m por cuadrícula. Se utilizaron parámetros ambientales predeterminados, pero debido a que la ubicación del estudio no está disponible en el software, la longitud y latitud de la ubicación se establecieron manualmente. Debido a la ubicación, algunos parámetros físicos dependientes de la ubicación, como la temperatura, la humedad y la velocidad

del viento, se establecieron en función de los datos de BMKG Indonesia (Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika) o la Agencia Indonesia de Meteorología, Climatología y Geofísica. Los parámetros ambientales utilizados fueron la temperatura del aire (23°C-33°C, promedio 27° C), la humedad relativa (47-89%, promedio 48%) y la velocidad del viento establecida en 1 m/s de este a oeste. La simulación se ejecutó durante 18 horas, desde las 4:00 hasta las 22:00. Debido a que la ubicación se encuentra en el hemisferio sur, el día elegido para el cálculo es el solsticio de verano para el hemisferio sur, que es el 21 de diciembre, el día más caluroso del año.

El modelo base utilizó el pavimento de hormigón existente con un albedo de 0,25, representando superficies grises estándar en condiciones reales. Estos valores se aplicaron en todas las superficies del suelo, incluidas las calles, el pavimento y los espacios comunes. La vegetación se modeló como objetos volumétricos tridimensionales, como en su condición de la vida real, teniendo en cuenta la densidad del área foliar (LAD, en inglés), la altura de los árboles y la forma de la copa. ENVI-met simula la vegetación como agentes microclimáticos dinámicos que influyen en el sombreado solar, la evapotranspiración y el flujo del viento. Como Bruse y Fler (1998) sugirieron, estos parámetros permiten que el modelo simule el efecto de la vegetación sobre la temperatura y el flujo de aire de manera más realista. La vegetación existente en terreno, en su mayoría árboles de tamaño mediano con copas anchas, se integró en la simulación y se exploraron escenarios ecológicos adicionales para evaluar su impacto en las condiciones térmicas exteriores.

La simulación tuvo como objetivo aislar y comparar los efectos de la configuración del edificio (relaciones H/W y orientación), el material de la superficie (variación del albedo) y los patrones de vegetación en las condiciones del microclima exterior. La simulación evalúa la radiación difusa, directa y reflejada de onda corta (SW, en inglés), la velocidad del viento y la temperatura radiante media (MRT, en inglés). Estos parámetros son cruciales para comprender el confort térmico. La radiación SW difusa contribuye a la carga de calor radiante incluso en condiciones de sombra. La radiación SW directa puede aumentar significativamente las temperaturas de la superficie. La radiación SW reflectante mide la porción de radiación solar reflejada

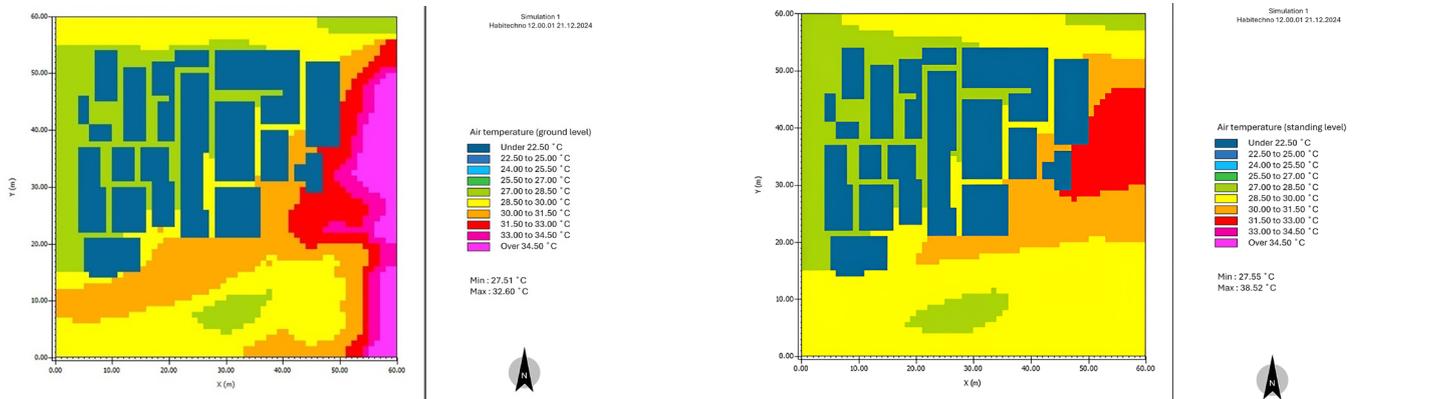


Figura 3. (A) Radiación reflejada a nivel del suelo; (B) Radiación reflejada a nivel de pie. Fuente: Preparado por los autores.

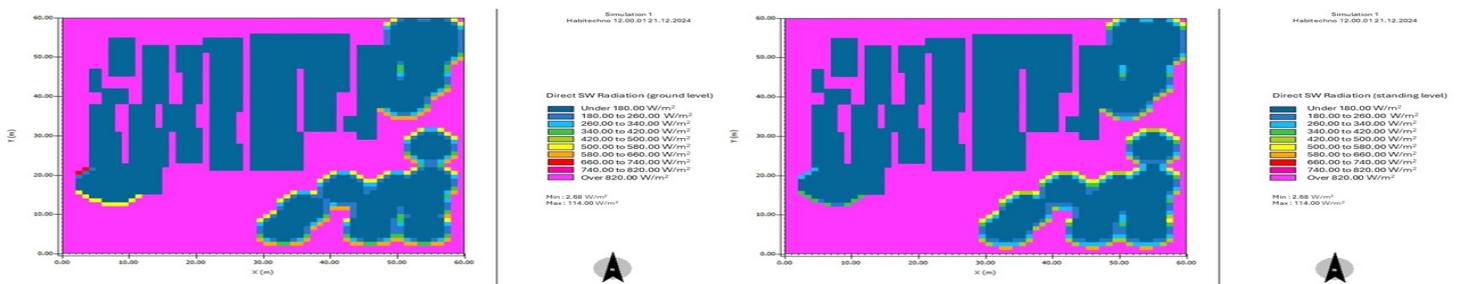


Figura 4. (A) Radiación SW directa a nivel del suelo. (B) Radiación SW directa a nivel de pie. Fuente: Preparado por los autores.

desde la superficie urbana. La velocidad del viento influye en el enfriamiento convectivo y la circulación del aire. Los resultados proporcionaron información sobre la distribución de la temperatura, la temperatura radiante media (MRT) y la velocidad del viento, que contribuyen de manera crucial al confort térmico percibido al aire libre. La MRT representa el efecto combinado de todas las fuentes de radiación en la percepción térmica humana.

La simulación comparó las variaciones de temperatura tanto en el suelo (0,5 m) como en el nivel de pie (1,5 m). El nivel del suelo proporciona información sobre el entorno térmico a la altura a la que se sientan los niños y la acumulación de calor en la superficie del suelo. El nivel de pie representa la altura promedio de un peatón adulto y la exposición térmica crítica durante las actividades típicas al aire libre. La evaluación de ambos garantiza una comprensión integral de los factores clave para el confort térmico al aire libre y conduce a recomendaciones de diseño urbano más precisas y sensibles al contexto.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA Y MATERIALES DE LA SUPERFICIE

El análisis de la temperatura del aire revela una diferencia significativa entre el nivel del suelo y el nivel de pie. La Figura 3 muestra que la temperatura cerca del suelo es

consistentemente superior a la que se encuentra a 1,5 metros sobre el nivel del suelo. Esta variación se atribuye principalmente a la reflectividad de los materiales de la superficie (albedo). En esta simulación, el material de recubrimiento de la superficie utilizado para el corredor es hormigón con alto albedo, como en el escenario de la vida real. Los materiales de alto albedo aumentan la acumulación de calor en las áreas urbanas, exacerbando el estrés térmico (Synnefa et al., 2007).

Un examen más detallado de la radiación solar (Figura 3 y Figura 4) indica que la radiación directa y difusa no difieren significativamente entre las dos alturas. Existen diferencias entre los valores de radiación en áreas con una relación <1 H/W a nivel de pie y a nivel del suelo, como se muestra en el área rectangular resaltada (Figura 3). La radiación reflejada de onda corta (SW) (Figura 5) muestra un aumento notorio a nivel del suelo. Dado que no existe un número estándar específico para esta radiación, este estudio examina los valores a diferentes niveles de altura. Este resultado indica que la dependencia entre la superficie del suelo y la relación H/W contribuye a temperaturas ambientales elevadas.

### Efectos en la disposición de las construcciones

Una orientación de calle E-O gana 30-36 °C a nivel del suelo y 33-39 °C a nivel de pie en una relación >1 H/W, y una orientación de calle N-S tiene un rango de MRT de 42-48 °C a nivel del suelo y 51-54 °C a nivel de pie (Tabla 1). La

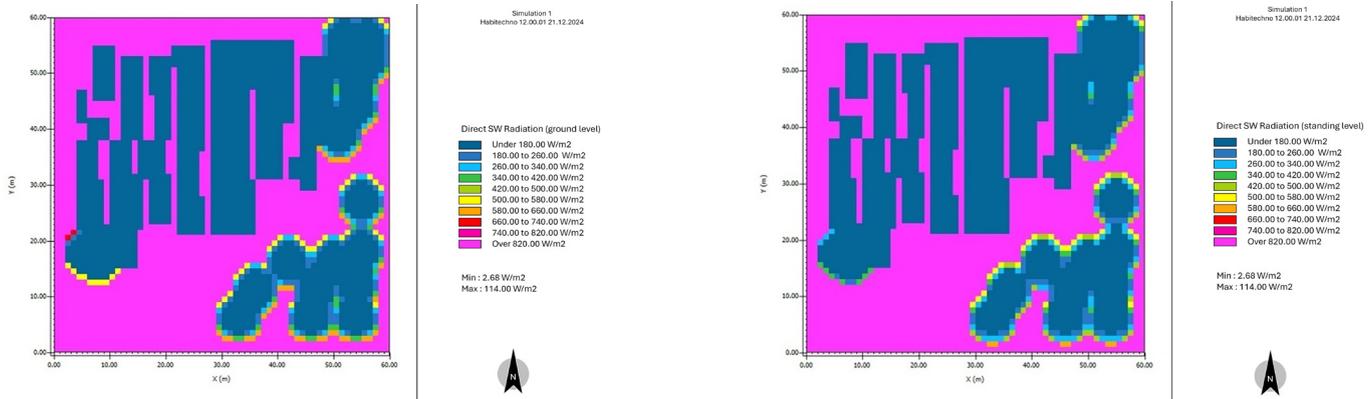


Figura 5. (A) Radiación SW reflejada a nivel del suelo. (B) Radiación SW reflejada a nivel de pie. Fuente: Preparado por los autores.

Tabla 1. Valores de diferentes relaciones H/W e intervalos de MRT: . Fuente: Preparado por los autores.

Relación H/W	Orientación a la calle	Rango de MRT nivel del suelo (°C)	Rango de MRT nivel de pie (°C)
0,83	E-O	48-51	51-54
1,66	E-O	33-36	36-39
2,5	E-O	30-33	33-36
5	E-O	30-33	33-39
1,25	N-S	45-48	51-54
2,5	N-S	45-48	51-54
5	N-S	42-45	51-54

MRT normal debería ser inferior a 40 °C (Nikolopoulou y Steemers, 2003; Pamungkas et al., 2024), lo que hace que la orientación de la calle E-O sea más cómoda que la N-O. Este resultado difiere de otros estudios previos en los que la orientación de la calle E-O crea una condición térmica más incómoda que la N-E.

Este resultado muestra que la disposición de las construcciones y la relación H/W son críticas para modificar las condiciones térmicas a través del sombreado. Los resultados de la simulación confirman que la relación altura-anchura (H/W) de las calles influye en la eficiencia del sombreado. En este estudio de caso, la trayectoria del sol está ligeramente por encima del ecuador, por lo que la luz del sol que incide sobre la masa del edificio al norte de la carretera proyecta sombras en la calle E-O. Además, las calles N-S con una relación H/W de >1 proporcionan más sombra, reduciendo efectivamente la MRT en el suelo y el nivel de pie (Figura 5). La disposición de las construcciones también influye significativamente en la eficiencia del sombreado. Estudios previos indican que una relación H/W >1 proporciona una sombra efectiva, minimizando la exposición directa a la radiación solar (Taleghani et al., 2014; Ali-Toudert y Mayer, 2006).

Además, la orientación de la calle afecta el acceso solar en el corredor de la calle. Como sugiere un estudio previo

(Ali-Toudert y Mayer, 2006), las orientaciones este-oeste resultan más efectivas para proporcionar sombra y mejorar el confort térmico. Esta orientación crea áreas sombreadas más amplias durante todo el día, lo que reduce la exposición al calor en los senderos peatonales y los espacios públicos. Estudios en ciudades tropicales, como los realizados por Johansson y Emmanuel (2006), confirman que diseños urbanos adecuados pueden mitigar significativamente el estrés por calor, particularmente cuando se integran con vegetación y sombreado de formas construidas.

### Vegetación y flujo de viento

Esta simulación muestra diferencias en la velocidad del viento a nivel del suelo y de pie en el perímetro del asentamiento y en las áreas interiores al aire libre. El perímetro tiene una carretera principal ancha, una relación H/W <1, y contiene un grupo de árboles trembesi, mientras que el interior al aire libre tiene una relación H/W >1. En áreas con una relación H/W >1, la velocidad del viento permanece estable entre 0,15 y 0,45 m/s, mientras que en áreas con una relación H/W <1, la velocidad del viento varía entre 0,3 y 1,2 m/s tanto a nivel del suelo como de pie (Figura 6).

La vegetación contribuye tanto a la sombra como a la regulación del flujo del viento. Esta simulación revela que la

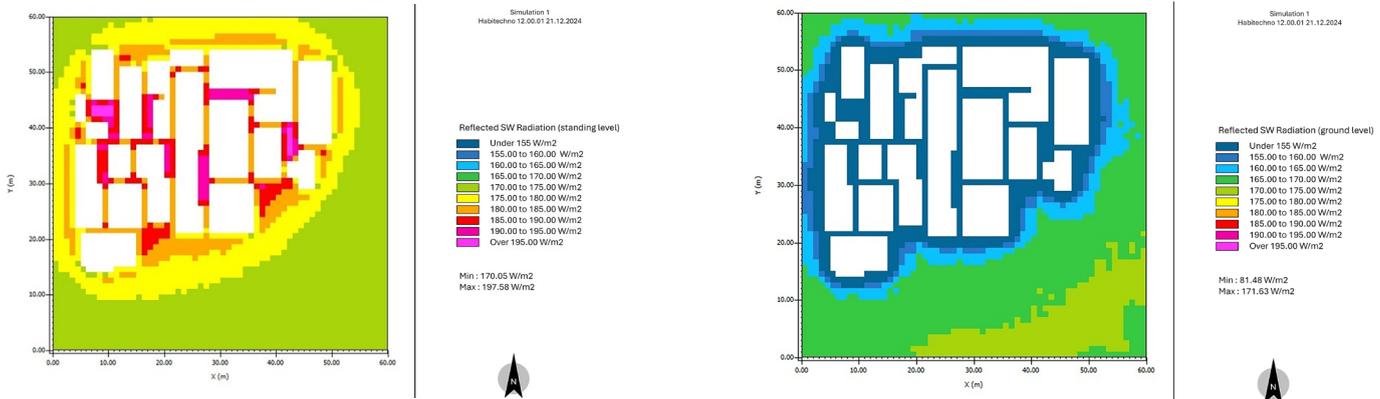


Figura 6. (A) MRT a nivel del suelo. (B) MRT a nivel de pie. Fuente: Preparado por los autores.

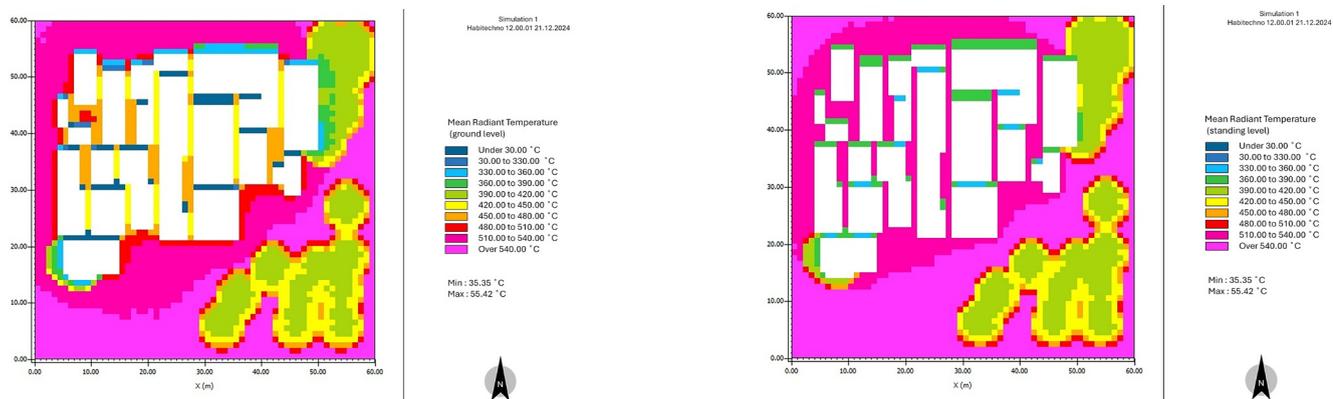


Figura 7. (A) Velocidad del viento a nivel de pie. (B) Velocidad del viento a nivel de pie. Fuente: Preparado por los autores.

velocidad del viento generalmente es mayor a nivel de pie que a nivel del suelo en el perímetro del asentamiento (Figura 7), lo que indica una interrupción causada por la fricción superficial. Esto también indica que el movimiento del aire es bastante cómodo con  $<2,5$  m/s para los habitantes, para las frecuentes actividades sentadas al aire libre. Por otro lado, este estudio muestra que la vegetación no juega un papel activo en áreas de alta relación H/W y morfología regional orgánica, a diferencia de varios estudios previos (Liu et al., 2023; Rodríguez et al., 2025; Suryantara et al., 2019).

No obstante, los espacios abiertos con vegetación demuestran una mayor velocidad del viento, lo que sugiere que la vegetación estratégicamente ubicada puede mejorar la ventilación natural y al mismo tiempo reducir el estrés térmico. En este caso, la vegetación de la zona oriental es un árbol trembesi (*Samanea saman*) con un tronco grande y una copa ancha. Por ende, el aire a nivel del suelo y de pie se ventila bien en toda su área. Otros investigadores también han demostrado que la vegetación colocada estratégicamente puede reducir las temperaturas urbanas hasta en  $5$  °C, mejorando significativamente las condiciones microclimáticas (Dimoudi y Nikolopoulou, 2003; Shashua- Bar y Hoffman, 2000).

Además, la sombra de los árboles proporciona varios efectos de enfriamiento a través de los búfers de la radiación solar y la

evapotranspiración, reforzando el papel de la vegetación en la mejora de las condiciones microclimáticas. Estos hallazgos se alinean con estudios previos que enfatizan la importancia de integrar la vegetación en los asentamientos para la optimización del confort térmico. Además, Bowler et al. (2010) destacaron que la vegetación puede contribuir a los efectos de enfriamiento a largo plazo, reduciendo la intensidad de las islas de calor urbanas. Estudios recientes han demostrado que combinar copas de árboles con superficies permeables del suelo puede amplificar los efectos de enfriamiento (Morakinyo et al., 2017), reforzando la importancia de integrar estrategias de ecologización urbana. Una estrategia que puede ser una opción viable para callejones estrechos es un jardín vertical y plantas en macetas. Además, los árboles contribuyen a la regulación del flujo de aire al aumentar la velocidad del viento en espacios abiertos, promoviendo aún más los efectos de enfriamiento, como se demostró en estudios en asentamientos urbanos densos en Asia (Ng et al., 2011).

### Implicaciones para la planificación urbana

Los resultados resaltan la importancia de las estrategias holísticas de diseño urbano que integran la disposición de los edificios, la selección de materiales y la vegetación para crear ambientes exteriores térmicamente cómodos. La ubicación estratégica de la vegetación, particularmente

en espacios abiertos a lo largo del eje del corredor oeste-este, es esencial. Los estudios confirman que el sombreado reduce la radiación directa en las superficies al tiempo que mantiene despejados los corredores de viento (Shashua-Bar y Hoffman, 2000). Como se ve en la Figura 6, la MRT en el corredor O-E es más alto que el corredor N-S en coordenadas de altitud similares. La colocación, incluidos los jardines en la azotea y la vegetación de la terraza en el segundo o tercer piso, puede promover la evapotranspiración y mejorar el confort térmico en niveles más altos, especialmente en una relación H/W >1 (Morakinyo et al., 2017; Perini y Magliocco, 2014). Esta estrategia también se vuelve aún más crucial para un corredor con relación O-E H/W <1, ya que controla la velocidad del viento. Los jardines verticales, como las paredes verdes y la plantación de fachadas, también ayudan a regular las temperaturas de los edificios y mejoran la calidad del aire.

Los pavimentos y fachadas de colores claros pueden reflejar más luz solar y absorber menos calor, lo que los hace adecuados para áreas abiertas (Synnefa et al., 2007; Santamouris, 2013). Sin embargo, la reflectividad excesiva puede atrapar el calor dentro de espacios confinados en callejones estrechos con edificios muy cerrados, lo que genera efectos de calentamiento involuntarios. Los estudios futuros deberían explorar combinaciones de materiales permeables y de alto albedo existentes óptimos para garantizar una mitigación equilibrada del calor.

Este estudio demuestra que las superficies del piso de albedo en áreas al aire libre pueden elevar el estrés por calor de los peatones en kampungs urbanos con espacios estrechos flanqueados por edificios estrechos de dos a tres pisos. El aumento de la reflectividad conduce a una mayor exposición al calor radiante, lo que compensa los beneficios de la reducción de la temperatura del aire. Como resultado, los peatones pueden experimentar una mayor incomodidad térmica a pesar de las condiciones ambientales más frías. Este estudio destaca la importancia de considerar una interacción climática más amplia al aplicar dichos materiales para pavimentar, en lugar de concreto.

El diseño de asentamientos compactos en áreas de alta densidad requiere una planificación cuidadosa para integrar corredores de ventilación y ajustar la composición de las relaciones H/W de los edificios y las orientaciones de las calles. Los espacios entre los edificios a lo largo del eje norte-sur mejoran el flujo de aire, mientras que los búfers de vegetación en el lado este-oeste son reguladores térmicos. Estos búfers reducen la exposición a la radiación y filtran los contaminantes de manera efectiva.

Los espacios semiabiertos y las áreas comunes sombreadas dentro de asentamientos densos pueden mejorar la resiliencia social y ambiental al reducir el estrés por calor y promover el bienestar público. Estas estrategias son pautas prácticas para los urbanistas y arquitectos que diseñan asentamientos kampung de alta densidad en climas tropicales.

Mejorar el confort térmico en callejones estrechos dentro de asentamientos de alta densidad requiere un enfoque multifacético que considere las limitaciones espaciales, las

necesidades espaciales privadas y las condiciones climáticas. Los planificadores urbanos deben comprometerse con las comunidades y autoridades locales para implementar diseños y políticas para esta área con desarrollo orgánico. La planificación regional requiere un enfoque impulsado por la comunidad que pueda sinergizar la implementación de ideas y políticas en áreas públicas, el dominio del diseño del planificador y la implementación de ideas en superficies de edificios, que son el dominio del diseño privado. Al implementar la política en áreas privadas, los urbanistas deben fomentar la integración de materiales de construcción sostenibles esenciales para mejorar el confort térmico a largo plazo.

## CONCLUSIONES

Este estudio examina la influencia de los materiales de la superficie, la disposición de los edificios y la vegetación en el confort térmico al aire libre en los kampungs urbanos. Cada factor juega un papel crucial en la modificación del microclima de los espacios al aire libre, con implicaciones significativas para el diseño y la planificación urbana. Abordar estos factores de manera integral puede fomentar entornos urbanos de alta densidad más saludables y habitables.

El estudio revela que los materiales de superficie de alto albedo tienden a elevar la temperatura del aire debido a sus propiedades reflectantes, particularmente las superficies del suelo. Se prefieren materiales de pavimentación de albedo más bajo para mitigar la acumulación de calor. Las disposiciones de las construcciones con una alta relación altura/ancho (H/W) proporcionan una sombra efectiva, minimizan la radiación solar directa y reducen la temperatura radiante media (MRT). Una orientación del edificio de este a oeste es más efectiva para crear áreas exteriores sombreadas. La vegetación mejora el confort térmico al proporcionar sombra y ET, lo que ayuda a disipar el calor. Este estudio revela que tiene un impacto menor en el aumento del flujo de viento en corredores de relación >1 H/W y estructuras orgánicas que cuando es <1, ya que la masa constructiva reduce la velocidad del viento. Para maximizar sus beneficios, la vegetación debe colocarse estratégicamente alrededor de espacios abiertos para optimizar el flujo de aire.

Esta investigación enriquece la comprensión del confort térmico al aire libre en kampungs urbanos de alta densidad, que puede ser una base en la toma de decisiones de los planificadores urbanos. Los hallazgos sirven como una referencia valiosa para los urbanistas, arquitectos y legisladores que buscan diseñar kampungs urbanos sostenibles y térmicamente cómodos o asentamientos de alta densidad. Sin embargo, la implementación efectiva requerirá la colaboración con las comunidades locales, ya que las superficies privadas de los edificios determinan en gran medida las condiciones térmicas exteriores.

En general, el estudio contribuye significativamente al discurso sobre el confort térmico al aire libre en kampungs

urbanos densos. Enfatiza la necesidad de abordar las variables microclimáticas a través de un enfoque de diseño holístico. Las investigaciones futuras deberán incorporar la validación del confort térmico, simular el efecto de los ajustes del diseñador, realizar un monitoreo a largo plazo y explorar factores ambientales adicionales, como el control de la humedad y las características del agua. Los estudios comparativos en múltiples kampungs urbanos podrían mejorar aún más la aplicabilidad de estos hallazgos.

## CONTRIBUCIÓN DEL AUTOR CRediT

Conceptualización, R. P., S., D. K.; Curación de datos, R. P., S., D. K.; Análisis formal, R. P., S.; Adquisición de financiación, R. P., S., D. K.; Investigación, R. P., S., D. K.; Metodología, R. P., S.; Administración de proyectos, D. K.; Recursos, R. P., S., D. K.; Software, S.; Supervisión, D. S.; Validación, R. P., S.; Visualización, R. P., S.; Escritura-borrador original, R. P.; Escritura-revisión y edición, R. P., S.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación está financiada por el programa P3MI titulado “Desarrollo de tecnología aplicada de unidades de vivienda y vecindarios en Kampong Kota”, bajo el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción, Institut Teknologi Bandung.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abaas, Z. R. (2020). Impact of development on Baghdad's urban microclimate and human thermal comfort. *Alexandria Engineering Journal*, 59(1), 275–290. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.12.040>

Akbari, H., Davis, S., Dorsano, S., Huang, J., & Winert, S. (1992). *Cooling our communities: A guidebook on tree planting and light-colored surfacing*. United States Environmental Protection Agency. <https://doi.org/10.2172/10155334>

Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295–310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)

Aleksandrowicz, O., & Pearlmutter, D. (2023). The significance of shade provision in reducing street-level summer heat stress in a hot Mediterranean climate. *Landscape and Urban Planning*, 229, 104588. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104588>

Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41(2), 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.013>

Arnfield, A. J. (1990). Street design and urban canyon solar access. *Energy and Buildings*, 14(2), 117–131. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(90\)90031-D](https://doi.org/10.1016/0378-7788(90)90031-D)

Asriana, N., Rahmah, F. F., & Mezzaluna, N. A. (2024). Characteristics of Public Open Space Area in the Kampung Settlement (Case Study: Kampung Cungkeng). *Journal of Architectural Design and Urbanism*, 6(2), 63–73. <https://doi.org/10.14710/jadu.v6i2.21705>

Baniassadi, A., Heusinger, J., & Sailor, D. J. (2018). Building energy savings potential of a hybrid roofing system involving high albedo, moisture-retaining foam materials. *Energy and Buildings*, 169, 283–294. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.004>

Benrazavi, N., Benrazavi, R., Dola, K., Ujang, N., & Benrazavi, N. (2016). Effect of pavement materials on surface temperatures in tropical environment. *Sustainable Cities and Society*, 22, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.01.011>

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>

Bruse, M., & Fleer, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three-dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 13(3–4), 373–384. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5)

Cheng, Y., Liu, X., Zeng, Z., Liu, S., Wang, Z., Tang, X., & He, B.-J. (2022). Impacts of Water Bodies on Microclimates and Outdoor Thermal Comfort: Implications for Sustainable Rural Revitalization. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.940482>

Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: Microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35(1), 69–76. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00081-6)

Fintikakis, N., Gaitani, N., Santamouris, M., Assimakopoulos, M., Assimakopoulos, D. N., Fintikaki, M., Albanis, G., Papadimitriou, K., Chrysoschoides, E., Katopodi, K., & Doulas, P. (2011). Bioclimatic design of open public spaces in the historic centre of Tirana, Albania. *Sustainable Cities and Society*, 1(1), 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2010.12.001>

Gallardo, A., Palme, M., Lobato-Cordero, A., Beltrán, R., & Gaona, G. (2016). Evaluating Thermal Comfort in a Naturally Conditioned Office in a Temperate Climate Zone. *Buildings*, 6(3), 27. <https://doi.org/10.3390/buildings6030027>

Givoni, B., Noguchi, M., Saaroni, H., Pochter, O., Yaakov, Y., Feller, N., & Becker, S. (2003). Outdoor comfort research issues. *Energy and Buildings*, 35(1), 77–86. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00082-8)

Hamidah, N., Rijanta, R., Setiawan, B., & Marfai, Muh. A. (2017). “Kampung” as a Formal and Informal Integration Model (Case Study: Kampung Pahandut, Central Kalimantan Province, Indonesia). *Forum Geografi*, 31(1), 43–55. <https://doi.org/10.23917/forgeo.v31i1.3047>

Johansson, E., & Emmanuel, R. (2006). The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka. *International Journal of Biometeorology*, 51(2), 119–133. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0047-6>

- Kim, G., & Lee, G. (2024). Validation of CFD models of urban microclimates under high temperature and humidity conditions during daytime heatwaves in dense low-rise areas. *Building and Environment*, 266, 112087. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112087>
- Kim, J. Y., Park, C. Y., Lee, D. K., Yun, S. H., Hyun, J. H., & Kim, E. S. (2024). The cooling effect of trees in high-rise building complexes in relation to spatial distance from buildings. *Sustainable Cities and Society*, 114, 105737. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105737>
- Klemm, K. (2007). *Application of Numerical Simulation in Assessment of Microclimatic Condition in Urban Areas* [Paper Conference]. Proceedings of Building Simulation 2007: 10th Conference of IBPSA, 1130–1145. <https://doi.org/10.26868/25222708.2007.679>
- Liao, M.-C., Sung, W.-P., & Chen Shi, Q.-Q. (2024). Comparing Small Water Bodies' Impact on Subtropical Campus Outdoor Temperature: Measured vs. Simulated Data. *Buildings*, 14(5), 1288. <https://doi.org/10.3390/buildings14051288>
- Liu, Z., Li, J., & Xi, T. (2023). A Review of Thermal Comfort Evaluation and Improvement in Urban Outdoor Spaces. *Buildings*, 13(12), 3050. <https://doi.org/10.3390/buildings13123050>
- Mahmoud, A. H. A. (2011). Analysis of the microclimatic and human comfort conditions in an urban park in hot and arid regions. *Building and Environment*, 46(12), 2641–2656. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.025>
- Mandić, L., Đjukić, A., Marić, J., & Mitrović, B. (2024). A Systematic Review of Outdoor Thermal Comfort Studies for the Urban (Re)Design of City Squares. *Sustainability*, 16(12), 4920. <https://doi.org/10.3390/su16124920>
- Montazeri, H., & Blocken, B. (2013). CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 60, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.012>
- Morakinyo, T. E., Kong, L., Lau, K. K.-L., Yuan, C., & Ng, E. (2017). A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Building and Environment*, 115, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.005>
- Murakami, S. (2006). Environmental design of outdoor climate based on CFD. *Fluid Dynamics Research*, 38(2–3), 108–126. <https://doi.org/10.1016/j.fluiddyn.2004.10.006>
- Ng, E., Yuan, C., Chen, L., Ren, C., & Fung, J. C. H. (2011). Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, 101(1), 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.01.004>
- Nikolopoulou, M., & Steemers, K. (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, 35(1), 95–101. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00084-1)
- Pamungkas, L. S., Kusumawanto, A., & Marsoyo, A. (2024). Outdoor Thermal Comfort and Sustainability of Urban Village Life in The Small Ancient City at Tropic Area Yogyakarta, Indonesia: Approach with ENVI-Met. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 36(3), 130-143. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.36.3.33281>
- Perini, K., & Magliocco, A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(3), 495–506. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.003>
- Picot, X. (2004). Thermal comfort in urban spaces: Impact of vegetation growth. Case study: Piazza della Scienza, Milan, Italy. *Energy and Buildings*, 36(4), 329–334. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.044>
- Rochmania, W., & Sukmawati, A. M. (2024). Eksistensi Kampung Kota Melalui Pemberdayaan Masyarakat: Studi di Kampung Ondomohen, Kota Surabaya. *Journal Of Plano Studies*, 1(1), 1–11. <https://doi.org/10.36982/jops.v1i1.3992>
- Rodriguez, A., Wood, S., Carmeliet, J., Kubilay, A., & Derome, D. (2025). Local impact of trees on thermal comfort of pedestrians in streets. *Urban Climate*, 61, 102417. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102417>
- Setaih, K., Hamza, N., & Townshend, T. (August 26-28, 2013). *Assessment Of Outdoor Thermal Comfort In Urban Microclimate In Hot Arid Areas* [Paper Conference]. Proceedings of Building Simulation 2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France. <https://doi.org/10.26868/25222708.2013.2521>
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224-240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings*, 31(3), 221–235. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00018-3)
- Suryantara, B. K., Suryabrata, J. A., & Suryandono, A. R. (2019). The Effect of Vegetation in Various Canyon Geometry on The Thermal Comfort of Jakarta. *Journal of Architectural Research and Design Studies*, 2(2), 80–87. <https://doi.org/10.20885/jars.vol2.iss2.art9>
- Synnefa, A., Karlessi, T., Gaitani, N., Santamouris, M., Assimakopoulos, D. N., & Papakatsikas, C. (2011). Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. *Building and Environment*, 46(1), 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.06.014>
- Synnefa, A., Santamouris, M., & Akbari, H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings*, 39(11), 1167–1174. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.004>

Taleghani, M., Tenpierik, M., van den Dobbelen, A., & Sailor, D. J. (2014). Heat in courtyards: A validated and calibrated parametric study of heat mitigation strategies for urban courtyards in the Netherlands. *Solar Energy*, *103*, 108–124. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.033>

Uno, T., Oka, D., Hokoi, S., Ekasiwi, S. N. N., & Majid, N. H. A. (2018). Thermal Sensation and Comfort in Hot and Humid Climate of Indonesia. In T. Kubota, H. Rijal, H. Takaguchi (Eds.), *Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-8465-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-10-8465-2_13)

van den Bosch, M., & Ode Sang, Å. (2017). Urban natural environments as nature-based solutions for improved public health – A systematic review of reviews. *Environmental Research*, *158*, 373–384. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.05.040>

Wang, Y., & Su, T. (2025). The Impacts of Friendly Designs on the Long-Term Sustainability of Modern Urban Parks. *Sustainability*, *17*(3), 830. <https://doi.org/10.3390/su17030830>

Zhang, A., Li, W., Xia, C., & Guo, H. (2025). The impact of urban landscape patterns on land surface temperature at the street block level: Evidence from 38 big Chinese cities. *Environmental Impact Assessment Review*, *110*, 107673. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107673>

# ESTRATEGIAS DE REHABILITACIÓN DE APLICACIÓN GENERALIZADA EN MUROS DE CAPS EN TUCUMÁN, ARGENTINA

Recibido 08/04/2025  
Aceptado 11/05/2025

## WIDESPREAD APPLICATION OF REHABILITATION STRATEGIES FOR WALLS OF PUBLIC HEALTHCARE CENTERS IN TUCUMÁN, ARGENTINA

## ESTRATÉGIAS DE REABILITAÇÃO DE APLICAÇÃO GENERALIZADA EM PAREDES DE CENTROS DE ATENÇÃO PRIMÁRIA À SAÚDE EM TUCUMÁN, ARGENTINA

### **Amalita Fernández**

Arquitecta  
Becaria Doctoral- Auxiliar docente graduada, Facultad de Arquitectura y Urbanismo  
Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-5848-2685>  
[afernandez@herrera.unt.edu.ar](mailto:afernandez@herrera.unt.edu.ar)

### **Beatriz Silvia Garzón**

Doctora en ciencias  
Investigadora independiente- Profesora asociada, Facultad de Arquitectura y Urbanismo  
Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0003-3130-8895>  
[bgarzon2022@gmail.com](mailto:bgarzon2022@gmail.com)



## RESUMEN

Este trabajo aborda las deficiencias térmico-energéticas presentes en la envolvente vertical de los Centros de Atención Primaria de Salud (CAPS) en San Miguel de Tucumán, Argentina donde estudios previos revelan un desempeño inadecuado de sus muros, generándose una elevada demanda energética. Con el objetivo de proponer estrategias de rehabilitación masiva aplicables a los diversos tipos de soluciones constructivas existentes, se evalúan diferentes soluciones de aislamiento térmico que consideran sus prestaciones térmicas, costo económico y ciclo de vida. Mediante un análisis multicriterio con cálculo de ponderación, se seleccionaron las propuestas más convenientes. El análisis de la mejora en diez casos representativos evidencia un ahorro promedio de 21,32 % en calefacción y 15,41 % en refrigeración. Se concluye que la implementación de las estrategias seleccionadas presenta un potencial significativo para optimizar el comportamiento térmico y reducir la demanda energética en los CAPS de la región.

### Palabras clave

centros de salud, aislación térmica, muros, rehabilitación

## ABSTRACT

This work addresses the thermal-energy deficiencies in the vertical envelope of Primary Health Care (PHC) Centers in San Miguel de Tucumán, where previous studies reveal inadequate performance of their walls, resulting in a high energy demand. Different thermal insulation solutions are evaluated based on their thermal performance, economic cost, and life cycle to propose widespread rehabilitation strategies for the diverse types of existing construction solutions. The most convenient proposals were selected using a multi-criteria analysis with a weighting calculation. The analysis of the improvement in ten representative cases shows an average saving of 21.32% in heating and 15.41% in cooling. It is concluded that implementing the selected strategies has a significant potential to optimize thermal behavior and reduce energy demand in the region's PHC Centers.

### Keywords

health centers, thermal insulation, walls, rehabilitation

## RESUMO

Este trabalho aborda as deficiências térmico-energéticas presentes na envolvente vertical dos Centros de Atenção Primária à Saúde (CAPS) em San Miguel de Tucumán, Argentina, onde estudos prévios revelaram um desempenho inadequado das paredes, gerando uma elevada demanda energética. Com o objetivo de propor estratégias de reabilitação em larga escala aplicáveis aos diversos tipos de soluções construtivas existentes, são avaliadas diferentes soluções de isolamento térmico que consideram suas performances térmicas, custo econômico e ciclo de vida. Por meio de uma análise multicritério com cálculo de ponderação, foram selecionadas as propostas mais convenientes. A análise da melhoria em dez casos representativos evidencia uma economia média de 21,32% em aquecimento e 15,41% em refrigeração. Conclui-se que a implementação das estratégias selecionadas apresenta um potencial significativo para otimizar o comportamento térmico e reduzir a demanda energética nos CAPS da região.

### Palavras-chave:

centros de saúde, isolamento térmico, paredes, reabilitação

## INTRODUCCIÓN

Existe un creciente consenso sobre la importancia del cambio climático y el papel de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (Recalde et al., 2018; Mora-Barrantes et al., 2021), se sitúa al consumo energético global como una causa central (Gómez Cerdeiro, 2021; Mercado Burciaga, 2023). El sector el edificio, reconocido como un contribuyente significativo a esta crisis (Flores, 2021; Ortega-Díaz et al., 2023), representa actualmente cerca del 40 % de emisiones de CO<sub>2</sub> y un tercio del consumo energético mundial (Muñoz-Rojas et al., 2023; Abdou et al., 2021). La climatización resulta un factor determinante (Kuchen y Kozak, 2020; Galindo-Borbón et al., 2024) debido a la creciente demanda de confort térmico (Daioglou et al., 2022; Andersen et al., 2019). La envolvente edilicia es responsable de una parte sustancial de las pérdidas energéticas (Ascione et al., 2019; Bacelis et al., 2024), ofrece un potencial considerable para la optimización y reducción del consumo (Wang et al., 2019; Costantini-Romero y Francisca, 2022). Frente a este contexto, toda acción tendiente a disminuir la demanda energética a partir de la rehabilitación de la materialidad de las envolventes adquiere relevancia (Ré y Filippín, 2021). En Argentina, el sector edilicio es responsable de casi el 37 % del consumo final de energía, encabezado por el sector residencial, seguido en un 8,35 % por el sector comercial y público, (Ministerio de Economía, 2023) dentro del que se encuentra el subsector Salud. Si bien este subsector posee una participación menor en el consumo final de la energía respecto a otros sectores, éste se caracteriza por ser un servicio público de interés social (Urteneche et al., 2022).

La ciudad de San Miguel de Tucumán (SMT), ubicada en el noroeste argentino, presenta un clima subtropical con estación seca, inviernos secos y veranos lluviosos sobrepasando los 1000 mm anuales, con temperaturas que superan los 40 °C, (González y Ceballos, 2021; Giovino et al., 2022). Allí existen 32 CAPS que constituyen una infraestructura sanitaria para la comunidad local. Estudios previos realizados en estos CAPS (Fernández y Garzón, 2023; Fernández y Garzón, 2024) evidencian una ineficiencia energética significativa asociada al acondicionamiento térmico y deficiencias en el comportamiento higrótérmico de sus envolventes verticales. Esta situación impacta directamente en el confort de pacientes y personal, además de generar costos operativos elevados y una mayor demanda energética a la red local. Por lo tanto, la mejora del desempeño térmico de estos edificios no solo es relevante desde una perspectiva de confort y eficiencia, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental regional.

El objetivo del presente trabajo consiste en generar estrategias de rehabilitación sistemáticas para los cerramientos verticales exteriores (CVE) de los CAPS en SMT, diseñadas para su aplicación masiva en el

parque edilicio existente. En este contexto, el término *sistemáticas* se refiere a una metodología de evaluación y selección basada en criterios definidos y replicables, mientras que *aplicación masiva* se enfoca en su potencial de replicabilidad en múltiples edificios con tipologías similares. La innovación de esta investigación se fundamenta en la propuesta de una metodología original de evaluación y selección de estas estrategias. Dicha metodología se basa en un sistema de ponderación que considera el costo económico, prestaciones térmicas y análisis de ciclo de vida (ACV).

## METODOLOGÍA

Este estudio propone un análisis de estrategias de rehabilitación para la envolvente vertical de los CAPS ubicados en SMT. Inicialmente, se realiza un análisis de las propiedades térmicas de la envolvente vertical, seguido por la definición de propuestas y su factibilidad constructiva para el contexto. A continuación, se evalúa cada propuesta desde tres perspectivas: costo económico, propiedades térmicas y ACV.

En el análisis térmico, se calcula la resistencia térmica de cada propuesta de rehabilitación según el procedimiento establecido en la norma IRAM 11601 (2002). Para ello, se considera la ecuación 1, donde la resistencia térmica de un componente plano, formado por diversas capas homogéneas ( $R_i$ ), es igual a la suma de las resistencias de cada una de esas capas ( $R_1, R_2, \dots, R_n$ ) en m<sup>2</sup>W/K. A su vez, para determinar la resistencia de las distintas capas ( $R$ ), se emplea la ecuación 2, donde  $R$  es igual al cociente entre el espesor de la capa ( $e$ ) en metros y la conductividad térmica del material ( $\lambda$ ) expresada en W/mK.

$$R_t = R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{c1} + R_{cn} \quad (1)$$

$$R = e/\lambda \quad (2)$$

Para evaluar el ACV se emplea la Herramienta de Ayuda al Diseño para una Edificación más Sostenible (HADES). HADES es un software de código abierto desarrollado por el Instituto de Construcción Industrial de Cataluña (ITeC), diseñado para el análisis ambiental de materiales y elementos constructivos. El mismo, se basa en los principios y el marco metodológico establecido en las normas ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006). La elección de HADES se fundamenta en su accesibilidad, su interfaz intuitiva y su amplia base de datos de materiales de construcción comunes en el contexto español y latinoamericano, lo que facilita la modelización de las propuestas de rehabilitación consideradas en este estudio. Los indicadores considerados y evaluados, en este caso, son energía embebida (MJ/m<sup>2</sup>), el que indica la energía no renovable consumida durante el ciclo de vida

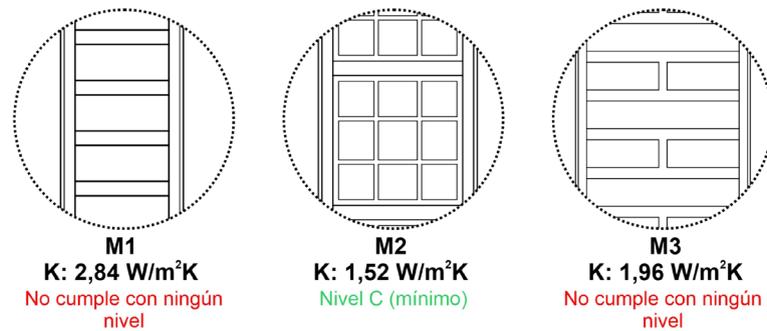


Figura 1. Soluciones constructivas de muros, coeficientes de transmitancia térmica y niveles de confort higrotérmico. Fuente: Elaboración de los Autores.

de los materiales, y las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes (kCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>), que cuantifican las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas.

Para el análisis económico, se consideraron los costos directos de materiales y mano de obra necesarios para la implementación de cada propuesta de rehabilitación. Se establecieron precios unitarios basados en el mercado local de SMT, promediándose distintos puntos de venta en la ciudad para los materiales. Los costos de mano de obra se basaron en valores actualizados de la UOCRA (Unión Obrera de la Construcción de la República Argentina) correspondientes al mes de noviembre de 2024. Se calculó el costo por metro cuadrado de cada propuesta de manera aislada, sin incluir detalles de terminación particulares que puedan variar según el caso específico. Los valores se expresaron en dólares estadounidenses.

A partir de estos análisis se seleccionó la estrategia más relevante mediante una metodología de ponderación numérica propia, diseñada para determinar objetivamente la más efectiva. A cada uno de los criterios mencionados, se le adjudicó el mismo peso porcentual. A su vez, dentro de cada criterio, se asignó una puntuación del 1 al 10 a las distintas propuestas, donde 1 representa el peor desempeño y 10 el mejor. La asignación de puntajes se basó en rangos de valores definidos para cada indicador. La puntuación total obtenida para cada propuesta se calculó al sumar la puntuación obtenida en cada criterio. La propuesta con la puntuación total más alta, que representa el mejor equilibrio entre los criterios evaluados, se consideró como la opción óptima para la rehabilitación.

Finalmente, se evaluó el comportamiento térmico estacionario global de 10 CAPS existentes en SMT, seleccionados mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia (Scharager y Reyes, 2001) con el objetivo de representar la diversidad de tipologías constructivas identificadas en el parque edilicio. Los criterios de selección incluyen la representatividad de los tipos de envolvente vertical existentes, diferentes emplazamientos y orientaciones. Esta selección se realizó con el fin de poder analizar con mayor profundidad el

comportamiento térmico de un número manejable de casos. Para cada uno de estos 10 CAPS, se define su envolvente vertical existente en el calculador CIDEE-EA (Elsinger et al., 2021), a partir de los detalles constructivos relevados *in situ*. Posteriormente, se modeló la aplicación de la propuesta de rehabilitación seleccionada a la envolvente vertical de cada uno de los 10 CAPS, en que se actualizaron los valores de transmitancia térmica según las propiedades de la solución de rehabilitación. Se analizaron la carga térmica anual de calefacción y la carga térmica de refrigeración, definidos según las normas IRAM 11604 e IRAM 11659-1. Se comparó el caso original con el caso rehabilitado, se analizó la incidencia porcentual de la mejora en el comportamiento térmico global para cada uno de los 10 CAPS representativos.

## RESULTADOS

### CARACTERIZACIÓN DE MUROS DE CAPS

Los CVE, de todos los CAPS presentes en SMT, se materializan a partir de mampostería de ladrillos cerámicos. Se distinguen tres soluciones constructivas: M1, mampostería de ladrillo cerámico macizo 0,15 m revocado en ambas caras con encadenado sismorresistente; M2 mampostería de ladrillo cerámico hueco 0,20 m revocado en ambas y M3 mampostería de ladrillo cerámico macizo 0,30 m revocado en ambas caras. El caso más típico es el M2, constituyéndose como la solución constructiva del 37,04 % de los CAPS; le sigue M3, que ocupa el 33,3 %; luego el muro M1, 18,52 % y por último existen edificios que combinan el M2 con M3, 11,11 % correspondiendo, este último caso, a edificios ampliados en un período posterior (Fernández y Garzón, 2021).

A continuación, se exponen (Figura 1) los niveles de transmitancia térmica para cada caso y su verificación con los niveles de confort higrotérmico recomendados por IRAM (A: ecológico, B: recomendado y C: mínimo). Se observa que en ningún caso se cumple con el nivel recomendado, y solo el muro tipo M2 cumple con el nivel mínimo.

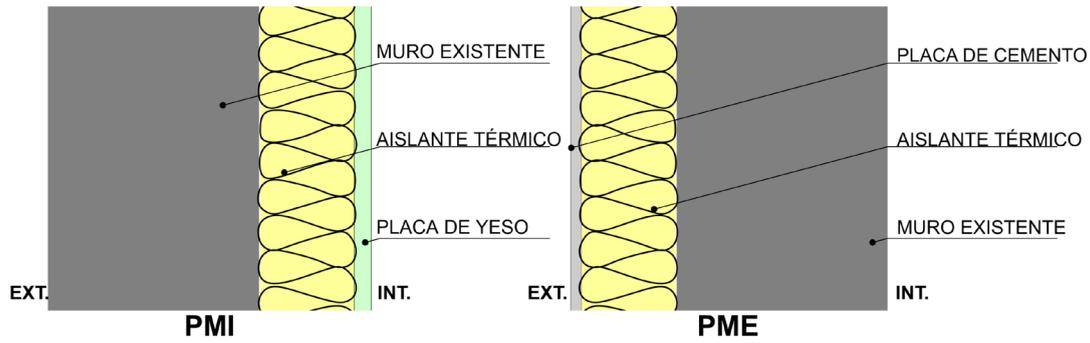


Figura 2. Esquema de propuestas de rehabilitación de CVE interior (PMI) y exterior (PME). Fuente: Elaboración de los Autores.

Tabla 1. Principales características técnicas de aislantes presentes en el mercado local. Fuente: Elaboración de los Autores.

Características	Poliestireno expandido (EPS)	Lana de vidrio (LV)	Lana de roca (LR)
Origen	Sintético	Mineral	Mineral
Estructura	Celular cerrado	Fibrosa	Fibrosa
Comportamiento al fuego	Auto extinguido	Incombustible	Incombustible
Permeabilidad al vapor de agua	Baja	Alta	Alta
Densidad	Baja 16 a 19 kg/m <sup>3</sup>	Media 30 a 70 kg/m <sup>3</sup>	Media-alta 35 a 160 kg/m <sup>3</sup>
Resistencia mecánica	Baja	Media	Media-alta
Precio	Medio	Medio	Alto

Tabla 2. Definición y asignación de nomenclaturas en las seis propuestas de rehabilitación. Fuente: Elaboración de los Autores.

Número de propuesta	Ubicación del aislante	Tipo de aislante	Nomenclatura de la propuesta
1	Exterior	EPS	PME_1
2	Exterior	LV	PME_2
3	Exterior	LR	PME_3
4	Interior	EPS	PMI_1
5	Interior	LV	PMI_2
6	Interior	LR	PMI_3

### Presentación de propuestas

Se presentan estrategias de rehabilitación aplicables en muros. En todos los casos, consisten en la incorporación de un aislante térmico intermedio y un material de terminación superficial, para ello se propone la incorporación del aislante en la cara interior (PMI) y exterior (PME) (Figura 2). Los tipos de aislante se seleccionan por su disponibilidad de forma

permanente en el mercado de SMT, como así también por tratarse de materiales de factible aplicación por la mano de obra local. Cabe destacar que para que el sistema propuesto resulte efectivo, debe estar correctamente ejecutado. Los mismos son poliestireno expandido en planchas, lana de vidrio con aluminio y lana de roca con aluminio. En la tabla 1, se expresan las principales características de los materiales aislantes seleccionados.

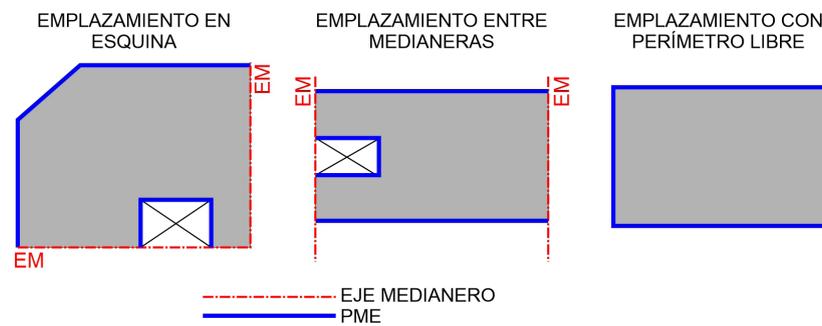


Figura 3. Esquema de aplicación de PME en función del tipo de emplazamiento. Fuente: Elaboración de los Autores.

Tabla 3. Análisis comparativo entre las principales características de cada una de las propuestas efectuadas. Fuente: Elaboración de los Autores.

Nomenclatura propuesta	Resistencia térmica [m <sup>2</sup> W/K]	Energía embebida [MJ/m <sup>2</sup> ]	CO <sub>2</sub> equivalente [kCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> ]	Costo económico por [US\$/m <sup>2</sup> ]
PME_1	1,93	30.660	3491	60,59
PME_2	1,74	26.621	2185	58,94
PME_3	2,16	21.884	1773	78,52
PMI_1	1,95	30.419	3450	32,36
PMI_2	1,77	26.381	2144	30,71
PMI_3	2,18	21.644	1733	50,30

Se propone incorporar los aislantes a través de perfiles de chapa galvanizada disponibles en el mercado y de medidas estándares, con una placa de construcción en seco de yeso para el interior y de fibrocemento para el exterior. La medida adoptada para el perfil y aislante es de 70 mm de espesor. Como resultado de estas combinaciones, tres tipos de aislante con dos posibilidades de colocación, se definen seis propuestas de rehabilitación de muros. Se les asigna las siglas PME para las propuestas de muros exteriores y PMI para las interiores; a su vez se asigna el número uno para aquellas con poliestireno expandido, número dos con lana de vidrio y tres con lana de roca. En la tabla 2, se muestra la nomenclatura asignada para cada propuesta considerada.

### FACTIBILIDAD CONSTRUCTIVA

La ejecución de las PME se encuentra condicionada por la configuración geométrica y emplazamiento de cada edificio. Se detectan tres tipos: entre medianeras (42,3 %), en esquina apoyado en dos medianeras (42,3 %) y de perímetro libre (15,38 %). Si bien estas soluciones presentan la ventaja de poder ejecutarse sin interrumpir las actividades del centro de salud, su aplicación se ve limitada en aquellos casos donde el edificio se encuentra adosado a muros. En estas situaciones, la intervención de manera global, solo es viable en los muros que colindan

con la vía pública o con patios internos (Figura 3). Esto se debe a que la aplicación de este sistema requiere de un espacio de trabajo suficiente para la colocación de los elementos constructivos y el posterior acabado. En el caso de los edificios ubicados en perímetros libres, la factibilidad constructiva es total, lo que permite la intervención de todos los muros exteriores.

Por otro lado, las PMI, aunque requieren la interrupción temporal de las actividades del CAPS, presentan la ventaja de poder aplicarse en todos los espacios interiores sin restricciones. Al ejecutarse en el interior del edificio, se elimina la necesidad de considerar factores externos como la protección contra la intemperie, lo que simplifica la logística y reduce costos de ejecución y riesgos de futuras patologías. Para minimizar el impacto en la atención al público, se recomienda realizar la obra por etapas, en que se intervenga cada ambiente de manera independiente.

### ANÁLISIS DETALLADO DE LAS PROPUESTAS

A continuación, se presentan las principales características de las propuestas efectuadas (Tabla 3). En primera instancia, se analiza la aislación térmica. Para ello, se estudia por un lado la resistencia térmica de cada solución de manera aislada. En segundo lugar, se estudia el ACV de cada propuesta mediante la herramienta HADES,

Tabla 4. Comparación de puntaje total entre aislación térmica, costo económico e impacto ambiental para las propuestas de rehabilitación de muros.  
 Fuente: Elaboración de los Autores.

Nomenclatura propuesta	Aislación térmica	ACV	Costo económico	TOTAL
PME_1	8.85	7.06	5.07	20.98
PME_2	7.98	8.13	5.21	21.32
PME_3	9.91	9.89	3.91	23.71
PMI_1	8.94	7.12	9.49	25.55
PMI_2	8.12	8.20	10.00	26.32
PMI_3	10.00	10.00	6.11	26.11

Carga térmica anual de calefacción

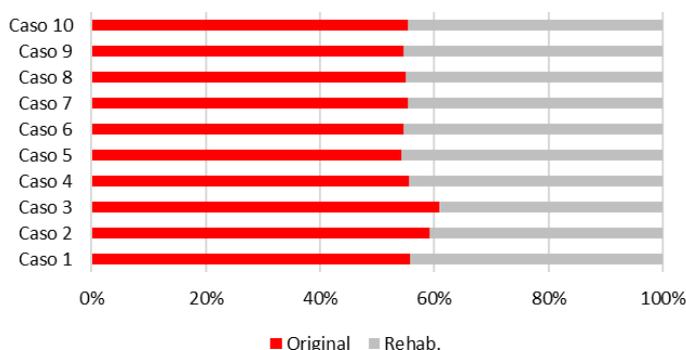


Figura 4. Carga térmica anual de calefacción, expresada en porcentaje para 10 CAPS existentes en SMT en su versión original y con propuesta de rehabilitación de CVE. Fuente: Elaboración de los Autores.

Carga térmica de refrigeración

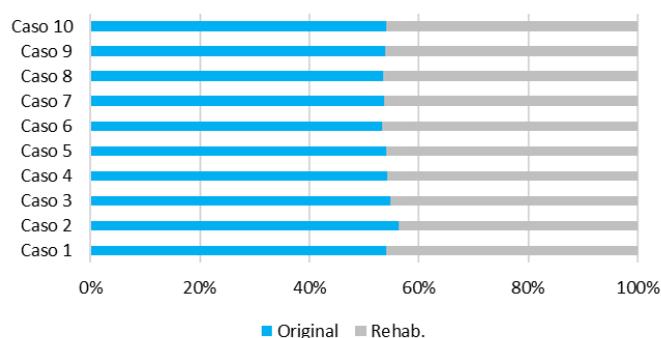


Figura 5. Carga térmica de refrigeración, expresada en porcentaje para 10 CAPS existentes en SMT en su versión original y con propuesta de rehabilitación de CVE. Fuente: Elaboración de los Autores.

considerándose los indicadores mencionados en la metodología. Por último, se evalúa el costo económico unitario, en U\$S/m<sup>2</sup> de cada una de ellas. En la tabla 3 se expresan estas propiedades para cada una de las propuestas efectuadas.

### PONDERACIÓN Y SELECCIÓN DE PROPUESTA

Para seleccionar la propuesta más adecuada en relación costo-beneficio, se asigna una puntuación a cada propuesta en función de su desempeño en cada criterio considerado y se suman entre sí. Esta puntuación va del 1 al 10, se otorga el puntaje más alto, a la propuesta que mejor se desempeña en cada criterio específico. Por ejemplo, en costo económico, se aplica la puntuación 10, a aquella con menor precio. El resto de las propuestas serán evaluadas de manera proporcional, es decir, cuanto más se acerque una propuesta al mejor desempeño en un factor, mayor será su puntuación. Esta asignación de puntuaciones se basa en una simple regla de tres simple, que permite una cuantificación objetiva del desempeño de cada propuesta en relación a las demás.

La propuesta valorada con mayor puntaje para muros es la PMI\_2 (Tabla 4). En este análisis comparativo se observa que, en térmicos de aislación térmica, la variación entre propuestas es de un 20 %, mientras que, en términos de costo económico, la misma reviste mayor relevancia aproximándose a un 50 % y en impacto ambiental un 30 %. A demás, las propuestas interiores cuentan con una mejor relación costo-beneficio, resultan más económicas y sustentables, que las exteriores.

### APLICACIÓN DE LA PROPUESTA A CASOS EXISTENTES

En última instancia, se analiza el comportamiento térmico de manera global de la propuesta de rehabilitación seleccionada aplicada a diez casos de CAPS existentes en la ciudad de SMT. Las variantes consideradas son la carga térmica anual de calefacción (kWh) y la carga térmica de refrigeración (W). Los gráficos expuestos a continuación (Figura 4 y Figura 5) expresan de manera comparativa ambas variantes consideradas, para cada uno de los casos en su versión original y con propuesta de rehabilitación de muros.

En ambas variantes, se observa una mejora significativa en el desempeño térmico global de los distintos casos. Para la carga térmica anual de calefacción, la mejora oscila entre un 17 y 30 %, con un valor promedio de 21,32 %. En el caso de la carga térmica de refrigeración, esta se encuentra entre un 13 y 22 % con una media de 15,41 %.

## DISCUSIÓN

La evaluación del comportamiento térmico del CVE existente en los CAPS revela, en general, valores de transmitancia térmica (K) elevados. Se registran valores de hasta 2,84 W/m<sup>2</sup>K, lo que supera significativamente el valor recomendado por la norma IRAM, 1,10 W/m<sup>2</sup>K para zonas cálidas. Estos valores elevados, tienen un impacto directo en el confort térmico de los usuarios, ya que dificulta mantener una temperatura interior estable y confortable. Además, repercute significativamente en el consumo energético de los edificios, que incrementa, la demanda de los sistemas de climatización para compensar las pérdidas o ganancias de calor a través de la envolvente, lo que se traduce en mayores costos operativos y huella de carbono.

En este trabajo se concluye que la propuesta más conveniente para la rehabilitación de muros en CAPS en SMT es PMI\_2 (aplicación de lana de vidrio como material aislante en la cara interior). Un factor adicional que refuerza la conveniencia de las propuestas interiores, es su viabilidad de aplicación en todos los casos de CAPS analizados, tal como se detalla en la sección de Factibilidad. Esta característica de aplicabilidad universal, sumada a su favorable desempeño en los criterios evaluados, la convierte en una intervención constructiva óptima para la rehabilitación generalizada.

El análisis de las soluciones de rehabilitación evalúa cada propuesta de manera aislada. Si bien esto permite una comparación objetiva en términos de propiedades térmicas, costo y sustentabilidad, no se considera en detalle las implicancias constructivas específicas para cada CAPS. La aplicación real de estas soluciones podría conllevar un mayor uso de materiales y, en consecuencia, un incremento en el impacto ambiental y el costo económico total de la intervención.

En cuanto a los riesgos e incertidumbres asociados con las soluciones propuestas, es importante señalar que la durabilidad a largo plazo de los materiales aislantes, especialmente en soluciones interiores, puede verse afectada por factores como la humedad y las variaciones de temperatura. Un mantenimiento inadecuado podría comprometer la eficiencia de la rehabilitación a lo largo del tiempo. Por ello, resulta fundamental contar con protocolos específicos de instalación y mantenimiento para garantizar la efectividad y durabilidad de las soluciones implementadas.

## CONCLUSIONES

Este estudio aborda la problemática de la deficiencia energética en CAPS de SMT, y propone estrategias de rehabilitación para su envolvente vertical de aplicación masiva. En resultado principal demuestra que la incorporación de aislante térmico en las caras interiores de los muros se consolida como la estrategia de rehabilitación más adecuada desde un enfoque económico, de sustentabilidad y factibilidad. Asimismo, se identifica a la lana de vidrio como el producto más adecuado del mercado local debido a su relación costo-prestaciones térmicas e impacto ambiental. La implementación de esta estrategia demuestra una mejora significativa en el comportamiento térmico-energético global de los CAPS analizados, con una reducción promedio del 15 % en la carga térmica de refrigeración y del 20 % en la carga térmica de calefacción.

La rehabilitación de las envolventes verticales en CAPS se traduce en múltiples beneficios. La reducción del consumo energético y la mejora del confort térmico contribuyen a la sostenibilidad de los servicios de salud, al minimizar su huella ambiental y optimizar la calidad de vida de los usuarios y del personal sanitario. Estos resultados se alinean con la creciente necesidad de implementar medidas de eficiencia energética en el sector edilicio, específicamente en su envolvente, tal como lo señalan diversos autores citados en el presente trabajo (Ascione et al., 2019; Bacelis et al., 2024; Wang et al., 2019; Costantini-Romero y Francisca, 2022; Ré y Filippín, 2021).

Esta investigación aporta una metodología de evaluación de estrategias de rehabilitación de la envolvente, basada en la aplicación de normas IRAM, criterios técnicos, económicos y ambientales. Su potencial de replicabilidad permite abordar desafíos de eficiencia energética en varios tipos de edificios, públicos y privados. En este sentido, los resultados y la metodología, ofrecen información valiosa para la formulación de políticas públicas. Éstas deben enfocarse en la sostenibilidad de la infraestructura de salud a nivel local y nacional, al impulsar la adopción de soluciones de rehabilitación energética con criterios técnicos y de ciclo de vida. En cuanto a futuras líneas de investigación, se sugiere explorar la implementación a mayor escala, el impacto del comportamiento de los usuarios y la integración de sistemas activos de climatización para una optimización energética integral. Finalmente, se concluye que la rehabilitación energética de la envolvente en los CAPS es una acción concreta y efectiva hacia la sostenibilidad de la infraestructura pública de salud.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRedit

Conceptualización, A.F., B.S.G.; Curación de datos, A.F., B.S.G.; Análisis formal, A.F., B.S.G.; Adquisición de financiación, no aplicable; Investigación, A.F.; Metodología, A.F., B.S.G.; Administración de proyecto, B.S.G.; Recursos, A.F., B.S.G.; Software, A.F., B.S.G.; Supervisión, B.S.G.; Validación, A.F., B.S.G.; Visualización, A.F., B.S.G.; Escritura – borrador original, A.F., B.S.G.; Escritura – revisión y edición, A.F., B.S.G.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por la financiación de la beca doctoral en la cual se enmarca este estudio, CONICET - PIUNT 712 SCAIT FAU UNT.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdou, N., Mghouchi, Y. E., Hamdaoui, S., Asri, N. E. y Mouqallid, M. (2021). Multi-objective optimization of passive energy efficiency measures for net-zero energy building in Morocco. *Building and Environment*, 204, 108141. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108141>

Andersen, M., martini, I., y Díscoli, C. A. (2019). Clasificación y evaluación del sector residencial orientada a la aplicación masiva de estrategias de reciclado edilicio. *AREA- Agenda de Reflexión en Arquitectura, Diseño y Urbanismo*, 25(1), 1–24. <http://157.92.122.77/index.php/area/article/view/289>

Ascione, F., Bianco, N., Maria Mauro, G., y Napolitano, D. F. (2019). Building envelope design: Multi-objective optimization to minimize energy consumption, global cost and thermal discomfort. Application to different Italian climatic zones. *Energy*, 174, 359–374. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.182>

Bacelis, G., Martínez Torres, K. E. y Ruíz Torres, R. P. (2024). Validación del rendimiento térmico en invierno del modelo de una vivienda de interés social. *Vivienda Y Comunidades Sustentables*, (15), 63–80. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i15.253>

Costantini-Romero, A. B., y Francisca, F. M. (2022). Construcción con bloques de suelo cemento como alternativa sostenible para envolvente edilicia. *Hábitat Sustentable*, 12(1), 114-125. <https://doi.org/10.22320/07190700.2022.12.01.08>

Daioglou, V., Mikropoulos, E., Gernaat, D., y van Vuuren, D. P. (2022). Efficiency improvement and technology choice for energy and emission reductions of the residential sector. *Energy*, 243, 122994. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122994>

Elsinger, D., Fernández, A., y Garzón, B. (2021). Calculador integral de eficiencia energética de la envolvente arquitectónica: CIDEE-EA. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - AVERMA*, 24, 77-88. <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/1964>

Fernández, A. y Garzón, B. (2021). Rehabilitación de muros exteriores en centros de salud en San Miguel de Tucumán para su eficiencia térmico-energética. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - AVERMA*, 24, 31-40. <https://averma.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/37116>

Fernández, A., y Garzón, B. S. (2023). Comportamiento higrótérmico y consumo energético de un centro de salud en San Miguel de Tucumán. *Arquitecto* (22), 1-11. <https://doi.org/10.30972/arq.227245>

Fernández, A., y Garzón, B. S. (2024). Análisis de patrones de consumo energético en centros de salud de baja complejidad en Tucumán, Argentina. *ARQUISUR Revista*, 14(26), 112-121. <https://doi.org/10.14409/ar.v14i26.13961>

Flores, P. (2021). La construcción sostenible en Latinoamérica. *Limaq*, 7(007), 161-173. <https://doi.org/10.26439/limaq2021.n007.5183>

Galindo-Borbón, C., Borbón-Almada, A., Ochoa-de-la-Torre, J. M., y Marincic-Lovriha, I. (2024). Análisis costo-beneficio de estrategias para eficiencia energética en vivienda, aplicando la normatividad vigente en el Noroeste de México. *Hábitat Sustentable*, 14(2), 32–47. <https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.02.03>

Giovino, M. L., García Villar, G., Dorado, P., y Rolón, G. (2022). Desempeño térmico simulado de un edificio construido con tierra alivianada encofrada en Tucumán. Memorias del Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra - SIACOT, (20), 559-570. <https://revistas.udelar.edu.uy/OJS/index.php/msiacot/article/view/1079>

Gómez Cerdeiro, C. (2021). Análisis de la importancia de la eficiencia energética en los hospitales [Trabajo de grado, Universidad de Cantabria]. Repositorio Abierto de la Universidad de Cantabria. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/22083>

González, M. V., y Ceballos, S. J. (2021). Las epifitas vasculares en un ambiente urbano están influidas por características del arbolado, el clima y las fuentes de propágulos. *Ecología Austral*, 31(2), 357–371. <https://doi.org/10.25260/EA.21.31.2.0.1354>

IRAM 11601 de 2002 [Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina] Por el cual se establecen Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. 10 de octubre de 2022. <https://materialidad2012.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/03/11601.pdf>

IRAM 11604 de 2002 [Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina] Por el cual se establecen Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrótérmicas. Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor. Cálculo y valores límites. 15 de febrero de 2001. [https://procesosconstructivos.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/08/iram\\_11604.pdf](https://procesosconstructivos.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/08/iram_11604.pdf)

IRAM 11659-1 de 2004 [Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina] Por el cual se establecen Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrótérmicas. Ahorro de energía en refrigeración. Parte 1: Vocabulario, definiciones, tablas y datos para determinar la carga térmica de refrigeración. 29 de noviembre de 2004. <https://catalogo.iram.org.ar/#/normas/detalles/9443>

ISO 14040. (2006). [International Organization for Standardization] Gestión ambiental – Análisis del ciclo de vida – Principios y marco de referencia. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>

ISO 14044. (2006). [International Organization for Standardization] Gestión ambiental – Análisis del ciclo de vida – Requisitos y directrices. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>

Kuchen, E., y Kozak, D. (2020). Transición energética argentina. El nuevo estándar de eficiencia energética en la evaluación de la vivienda social. Caso de estudio: Vivienda de Barrio Papa Francisco. *Hábitat Sustentable*, 10(1), 44-55. <http://dx.doi.org/10.22320/07190700.2020.10.01.04>

Mercado Burciaga, U. (2023). Estrategias frente al cambio climático desde un enfoque de sustentabilidad en el sector educativo de Jalcocotán. *Acta Universitaria*, 33, 1-15. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3699>

Ministerio de Economía. (2023). *Balance Energético Nacional 2023*. <https://www.argentina.gob.ar/econom%C3%ADa/energ%C3%ADa/planeamiento-energetico/balances-energeticos>

Mora-Barrantes, J. C., Sibaja-Brenes, J. P., y Borbón-Alpizar, H. (2021). Fuentes antropogénicas y naturales de contaminación atmosférica: estado del arte de su impacto en la calidad fisicoquímica del agua de lluvia y de niebla. *Revista Tecnología en Marcha*, 34(1), 92-103. <https://dx.doi.org/10.18845/tm.v34i1.4806>

Muñoz-Rojas, R., Figueroa-San Martín, R., y Saelzer-Fuica, G. (2023). Análisis comparativo en la rehabilitación de envolvente térmica de cerramientos educacionales con criterio ambiental. *AUS - Arquitectura / Urbanismo / Sustentabilidad*, (33), 4–11. <https://doi.org/10.4206/aus.2023.n33-02>

Ortega-Díaz, L., Cárdenas-Rangel, J., y Osma-Pinto, G. (2023). Estrategias de predicción de consumo energético en edificaciones: una revisión. *TecnoLógicas*, 26(58), e2650. <https://doi.org/10.22430/22565337.2650>

Ré, G. y Filippin, C. (2021). Evaluación energética y rehabilitación de la envolvente edilicia de una escuela en zona bioambiental templada cálida, Argentina. *Informes de la Construcción*, 73(563): e407. <https://doi.org/10.3989/ic.79374>

Recalde, M., Zabaloy, F. y Guzowski, C. (2018). El rol de la eficiencia energética en el sector residencial para la transición energética en la región latinoamericana. *Trayectorias*, (47), 77-102. <https://trayectorias.uanl.mx/public/anteriores/47/pdf/4.pdf>

Scharager, J., y Reyes, P. (2001). Muestreo no probabilístico. En J. Scharage y I. Armijo. *Metodología de la investigación para las Ciencias Sociales [CD-Rom]: Versión 1.0 Santiago: Escuela de Psicología, SECICO*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Programa computacional. <https://n9.cl/x29vo>

Urteche, E., Fondoso-Ossola, S. T., Martini, I, Barbero, D. A. y Discoli, C. A. (2022). Metodología para el mejoramiento de la eficiencia energética de la envolvente edilicia del sector salud. *Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo*, 11(21), 141-153. <https://doi.org/10.18537/est.v011.n021.a12>

Wang, W., Ge, X., y Xiong, H. (2019). *Thermal de-sign optimization and analysis on heating load of rural buildings in northern China*. *E3S Web of Conferences*, 136, 03018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913603018>

# PROTECCIÓN SOLAR EN EDIFICACIONES MEDITERRÁNEAS, MADRID, ESPAÑA: DISEÑO CON ALGORITMOS E INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Recibido 25/12/2024  
Aceptado 23/05/2025

## SOLAR PROTECTION IN MEDITERRANEAN BUILDINGS, MADRID, SPAIN: DESIGNING WITH ALGORITHMS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

## PROTEÇÃO SOLAR EM EDIFICAÇÕES MEDITERRÂNEAS, MADRI, ESPANHA: PROJETO COM ALGORITMOS E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

## RESUMEN

Este artículo analiza la integración de tecnologías digitales y algoritmos paramétricos en el diseño de sistemas de protección solar para edificaciones en contextos mediterráneos, como Madrid, España. Se utilizó un modelo base representativo de un edificio de escala media, se evaluaron cuatro configuraciones de protección solar mediante simulaciones avanzadas que incorporaron datos climáticos locales y trayectorias solares anuales. Las estrategias exploradas incluyen parasoles horizontales, inclinados, un diseño biomimético Voronoi y un modelo compuesto que combina estos enfoques. Los hallazgos destacan cómo la inteligencia artificial y los algoritmos computacionales permiten optimizar el rendimiento energético y el confort térmico, al tiempo que redefinen las posibilidades estéticas y sostenibles en la arquitectura contemporánea. Este enfoque propone un marco innovador para enfrentar los desafíos climáticos, que evidencia el potencial de las herramientas digitales en la transformación del diseño arquitectónico hacia un paradigma más resiliente y adaptativo.

### Palabras clave

diseño paramétrico, inteligencia artificial, sostenibilidad arquitectónica, protección solar

## ABSTRACT

This article examines the integration of digital technologies and parametric algorithms when designing solar protection systems for buildings in Mediterranean contexts, such as Madrid. Four solar protection configurations were evaluated through advanced simulations using a base model representative of a medium-scale building, incorporating local climatic data and annual solar trajectories. The strategies examined include horizontal louvers, inclined shading devices, a biomimetic Voronoi design, and a composite model that combines these approaches. The findings highlight how artificial intelligence and computational algorithms optimize energy performance and thermal comfort while redefining aesthetic and sustainable possibilities in contemporary architecture. This approach proposes an innovative framework to address climate challenges, showcasing the potential of digital tools to transform architectural design into a more resilient and adaptive paradigm.

### Keywords

parametric design, artificial intelligence, architectural sustainability, solar protection

## RESUMO

Este artigo analisa a integração de tecnologias digitais e algoritmos paramétricos no projeto de sistemas de proteção solar para edificações em contextos mediterrâneos, como o de Madri, na Espanha. Utilizou-se um modelo básico representativo de um edifício de escala média e avaliaram-se quatro configurações de proteção solar por meio de simulações avançadas que incorporaram dados climáticos locais e trajetórias solares anuais. As estratégias exploradas incluem toldos horizontais, inclinados, um design biomimético Voronoi e um modelo composto que combina estas abordagens. As conclusões destacam como a inteligência artificial e os algoritmos computacionais permitem otimizar o desempenho energético e o conforto térmico, ao mesmo tempo que redefinem as possibilidades estéticas e sustentáveis na arquitetura contemporânea. Esta abordagem propõe um quadro inovador para enfrentar os desafios climáticos, evidenciando o potencial das ferramentas digitais na transformação do projeto arquitetônico rumo a um paradigma mais resiliente e adaptativo.

### Palavras-chave:

diseño paramétrico, inteligência artificial, sustentabilidade arquitetônica, proteção solar

## INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de urbanización acelerada y desafíos ambientales, la arquitectura contemporánea emerge como una disciplina clave para enfrentar los efectos del cambio climático. En regiones mediterráneas como Madrid, la radiación solar representa un desafío crítico, especialmente durante los meses cálidos, al aumentar significativamente las temperaturas interiores de las edificaciones. Este fenómeno intensifica el uso de sistemas de climatización, lo que incrementa el consumo energético y las emisiones de carbono, lo que subraya la necesidad de soluciones arquitectónicas más sostenibles (García Molina et. al., 2024).

En este marco, las estrategias convencionales de protección solar, aunque efectivas en contextos pasados, resultan insuficientes frente a las demandas climáticas y energéticas actuales. Por ello, es fundamental explorar enfoques innovadores que integren tecnologías avanzadas, como algoritmos paramétricos, inteligencia artificial y geometrías adaptativas, para diseñar soluciones arquitectónicas más precisas y efectivas. Estas herramientas permiten desarrollar configuraciones optimizadas que responden dinámicamente a las condiciones climáticas variables, que reduce la ganancia térmica y mejorar el confort interior (De la Hoz-Torres et. al., 2024; Kolokotsa, et. al, 2022; Rodríguez-de-Ita y Sosa-Compeán, 2024).

Los avances en tecnologías digitales, algoritmos computacionales e inteligencia artificial han transformado profundamente la arquitectura contemporánea, que permiten optimizaciones energéticas y estéticas sin precedentes. La integración de estas herramientas no solo mejora la eficiencia energética, sino que también impulsa un diseño innovador que supera los límites de los enfoques tradicionales. Estudios como el de Tipán-Renjifo y Tipán-Suárez (2022) destacan cómo los patrones Voronoi, generados mediante algoritmos computacionales, permiten explorar morfologías complejas que responden directamente a las condiciones climáticas y funcionales, que optimizan el rendimiento energético y enriquecer el entorno construido (Chen, 2021). Además, este enfoque facilita la predicción y el ajuste dinámico de la incidencia solar, al lograr una reducción significativa de la radiación total en comparación con un modelo sin protección (Jalali et al., 2022). Por su parte, Wieser et al. (2024) subrayan que estas tecnologías posibilitan personalizaciones adaptativas que responden a variaciones climáticas estacionales y a necesidades de confort térmico. En particular, este enfoque optimiza la eficiencia energética y mejora el confort interior en climas como el de Madrid.

Los sistemas paramétricos no solo habilitan soluciones de gran complejidad formal, sino que también facilitan su producción mediante tecnologías como el corte láser o la impresión 3D. Betman et al. (2023) señalan que

estos métodos reducen desperdicios, costos y plazos de ejecución, al tiempo que aumentan la precisión en diseños basados en patrones Voronoi. Sin embargo, estas innovaciones enfrentan obstáculos: la elevada inversión inicial, la dependencia de software especializado y la necesidad de habilidades técnicas avanzadas pueden restringir su adopción en entornos con recursos limitados (Gamal et al., 2024).

Desde el punto de vista de sostenibilidad, estos sistemas no solo reducen significativamente el consumo energético asociado a la climatización, sino que también contribuyen a mitigar el impacto ambiental de los edificios, alineándose con objetivos globales de reducción de emisiones de carbono (Ramos-Sanz, 2019; Aghimien et al., 2022). Estéticamente, los algoritmos avanzados ofrecen una personalización que convierte cada proyecto en una obra única, mientras promueven una integración armónica con el entorno. Tipán-Renjifo y Tipán-Suárez (2022) destacan cómo estas soluciones reconfiguran el diálogo entre el edificio y su contexto, elevando la experiencia arquitectónica.

No obstante, Wieser et al. (2024) advierten que los sistemas dinámicos, como los parasoles individuales inclinados, requieren planificación de mantenimiento para garantizar su longevidad. Esto incluye redundancias y protocolos claros para prevenir fallos técnicos. A pesar de estas limitaciones, la integración de tecnologías digitales, inteligencia artificial y algoritmos avanzados en la arquitectura redefine el diseño contemporáneo, respondiendo a desafíos complejos que ofrecen soluciones adaptativas, sostenibles y creativas para el futuro (Atef et al., 2024). Como señala Betman et al. (2023), estas herramientas no solo optimizan el rendimiento energético, sino que también inspiran una nueva generación de propuestas arquitectónicas innovadoras.

Este artículo se centra en la evaluación de estrategias avanzadas de protección solar aplicadas a un modelo representativo de edificación en clima mediterráneo. A través de simulaciones detalladas, se comparan cuatro configuraciones: un modelo base sin protección, un sistema con parasoles horizontales, otro con parasoles individuales ajustados angularmente y una solución basada en patrones geométricos Voronoi. Estas configuraciones son analizadas en términos de su capacidad para mitigar la radiación solar y optimizar el rendimiento energético de las edificaciones (Amraoui et al., 2021). El trabajo busca demostrar cómo el uso de tecnologías digitales y enfoques inspirados en sistemas naturales puede superar las limitaciones de los modelos tradicionales, al promover una arquitectura más sostenible y adaptativa (Bertagna et. al., 2023). Este enfoque no solo aborda los desafíos asociados al cambio climático, sino que también establece un nuevo paradigma en el diseño arquitectónico, al integrar funcionalidad, innovación tecnológica y sostenibilidad en climas mediterráneos e iberoamericanos.



Figura 1. Vista del edificio residencial situado en Plaza España, 6, Getafe (Madrid), acompañado por su ubicación en el entorno urbano y esquema volumétrico del emplazamiento. Fuente: Google Maps (2025).

## METODOLOGÍA

Este estudio emplea un enfoque paramétrico y computacional para evaluar estrategias de protección solar en un contexto climático mediterráneo, al tomar como caso de referencia un edificio real en Getafe (Madrid, España). La metodología se estructura en cuatro etapas: caracterización del clima y del edificio, modelado y simulación de radiación solar, diseño de estrategias de protección, y análisis comparativo del rendimiento energético.

El primer paso consistió en caracterizar el clima mediterráneo de Getafe mediante datos de irradiancia global, temperatura y clasificación climática de Köppen (Csa: mediterráneo con verano caluroso). Con más de 2.800 horas de sol anuales y temperaturas estivales promedio superiores a 30 °C, la necesidad de protección solar es prioritaria. El edificio seleccionado es una edificación residencial multifamiliar de escala media, situada en Plaza España 6, Getafe (coordenadas 40.309300, -3.724501). Se trata de un prisma rectangular de 30 m x 50 m y 50 m de altura, con una superficie envolvente de 9.500 m<sup>2</sup> y un volumen total de 75.000 m<sup>3</sup>. Su forma compacta permite minimizar la superficie expuesta al intercambio térmico, facilitándose el análisis (Figura 1).

En una segunda etapa, se modeló digitalmente el edificio base sin protección solar, estableciéndose un escenario de referencia. A partir de simulaciones solares realizadas con Ladybug en Grasshopper, se obtuvo la distribución de radiación anual sobre cada una de las cinco caras expuestas: norte, sur, este, oeste y cubierta. Los valores se calcularon con precisión según las trayectorias solares específicas de Madrid, se consideró la radiación directa como difusa. Este análisis permitió identificar que las caras sur y superior concentran más del 60 % de la radiación recibida anualmente, lo que justificó su priorización en

el diseño de estrategias. La información se sintetiza en la Tabla 1, que recoge la radiación media por superficie, en la Figura 2, Figura 3 y Figura 4, donde se visualizan las diferencias de exposición.

A continuación, se diseñaron tres estrategias de protección solar: (1) parasoles horizontales con láminas de 1,50 m de profundidad y separación vertical constante; (2) parasoles inclinados individuales, dispuestos según ángulos solares predominantes y adaptados mediante módulos; y (3) una envolvente Voronoi biomimética, generada con algoritmos paramétricos que varían el tamaño de las perforaciones en función de la orientación y exposición solar. Cada estrategia se aplicó al mismo modelo base, y se generaron tres variantes que fueron sometidas a simulación bajo idénticas condiciones climáticas.

Las simulaciones evaluaron la radiación incidente por m<sup>2</sup> en cada cara del edificio. Los datos se procesaron con GPT4All, un modelo de IA local sin conexión externa, para garantizar reproducibilidad y trazabilidad. Para optimizar los parámetros geométricos de cada estrategia, se utilizaron algoritmos genéticos mediante Galapagos, y scripts personalizados en GhPython para ajustar las configuraciones a las condiciones específicas de Getafe.

Finalmente, se diseñó una cuarta variante: un modelo compuesto que combina las mejores soluciones detectadas en cada orientación. Este incluye parasoles inclinados en las fachadas este, oeste y sur, y una celosía Voronoi en la cara norte y en la cubierta, lográndose así una cobertura optimizada. El rendimiento de cada estrategia se comparó en términos de radiación total acumulada, reducción porcentual respecto al modelo base y distribución térmica por orientación. Toda la información se sistematizó en tablas comparativas e ilustrada mediante gráficos y simulaciones visuales que permiten comprender el desempeño de cada configuración desde un enfoque técnico y proyectual.

Tabla 1. Análisis del prisma base por caras. Fuente: Elaboración de los Autores.

Cara	Superficie (m <sup>2</sup> )	Radiación (kWh/m <sup>2</sup> )	Reducción (%)	Esquema
Sur	2500	2.981	00.0	
Este	1500	1.360	00.0	
Oeste	1500	1.398	00.0	
Norte	2500	0.976	00.0	
Superior	1500	2.299	00.0	

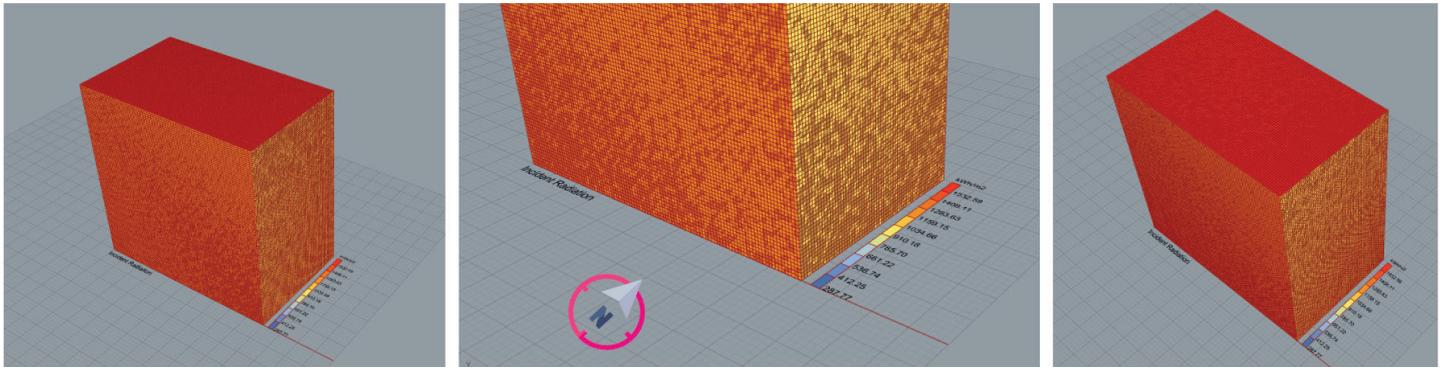


Figura 2. Simulación digital del prisma base con visualización de los valores de radiación solar en las superficies. Fuente: Elaboración de los Autores.

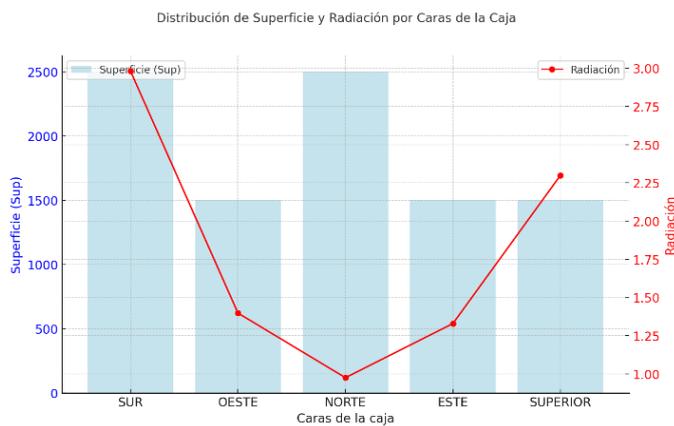


Figura 3. Distribución de superficie y radiación en las caras del prisma base, mostrándose la relación entre área y radiación recibida. Fuente: Elaboración de los Autores.

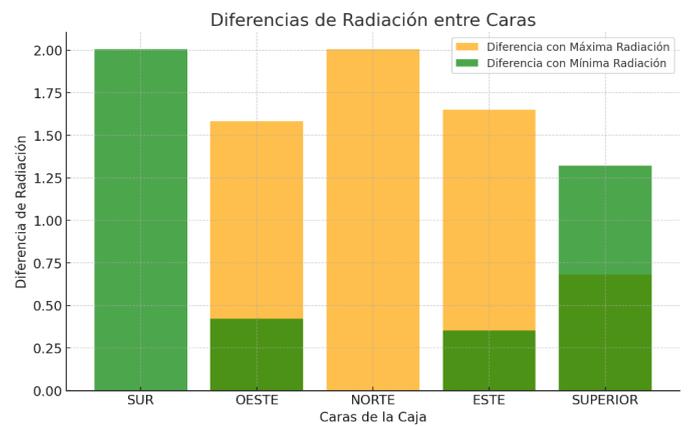


Figura 4. Variaciones de radiación por cara del prisma base, comparación de valores máximos y mínimos observados para destacar las diferencias de exposición en el modelo analizado. Fuente: Elaboración de los Autores.

## DISTRIBUCIÓN DE RADIACIÓN SOLAR POR CARA

Previo a evaluar las estrategias de protección solar, se analizó la distribución de la radiación incidente sobre cada una de las superficies del modelo base, sin elementos de sombreado. Esta etapa permitió identificar qué fachadas concentraban mayor exposición, estableciéndose los criterios de intervención geométrica. El modelo acumula un total anual de 9.415 kWh/m<sup>2</sup>, con las caras sur y superior que recibieron más del 60% de esa energía (Figura 2, Figura 3 y Figura 4). La tabla 1 resume los valores de radiación por cara y su superficie, lo que evidencia las diferencias según orientación:

Esta información sirvió como base comparativa para evaluar el desempeño de cada estrategia en la reducción de radiación solar incidente.

## DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE PROTECCIÓN SOLAR

De acuerdo con Urias-Barrera (2024), se analizaron tres estrategias de protección solar aplicadas al modelo base, diseñadas para minimizar la radiación solar incidente y optimizar la eficiencia energética junto con el confort térmico. Cada una de estas estrategias se fundamentó en principios de optimización geométrica y comportamiento solar, evaluándose mediante herramientas computacionales avanzadas.

1. Caja con parasoles horizontales. Se utilizaron láminas horizontales de sección rectangular, de 1.50 metros de profundidad y 0.25 metros de espesor, distribuidas uniformemente en las fachadas con una separación vertical constante de 0.75 metros. Estas dimensiones fueron determinadas para asegurar sombra efectiva en las horas de mayor incidencia solar, especialmente en verano. La elección del modelo horizontal responde a su capacidad demostrada para bloquear eficazmente la radiación directa proveniente de ángulos solares elevados, típica en latitudes mediterráneas, que conservan simultáneamente una adecuada entrada de luz natural en los meses menos cálidos.
2. Caja con parasoles individuales inclinados. Esta estrategia integra elementos individuales en forma de lamas cuadradas inclinadas en un ángulo variable entre 0° y -90°, diseñados según los ángulos solares predominantes a lo largo del año en Madrid. Cada parasol tiene dimensiones específicas de 1.50 metros de longitud, por 1.50 metros de ancho horizontal y 0.05 metros de espesor. Si bien, para efectos prácticos del cálculo inicial, se estableció una superficie modular amplia de 5 metros por 5 metros, es importante aclarar que, en la realidad constructiva, cada módulo visible está compuesto internamente por agrupaciones de parasoles individuales de dimensiones menores. Esto permite manejar eficientemente las dimensiones visualmente grandes que se observan en la imagen proporcionada, haciendo que la propuesta sea técnicamente viable,

lógica y factible desde una perspectiva constructiva, funcional y arquitectónica. La configuración inclinada responde así a la necesidad de proporcionar una protección más dinámica y efectiva frente a variaciones solares diarias y estacionales, mejorando notablemente la capacidad de adaptación térmica sin afectar negativamente la iluminación natural interna o la coherencia estética del edificio.

3. Caja con patrón Voronoi. Este modelo incorpora una estructura biomimética con celosías generadas mediante algoritmos paramétricos Voronoi. Las perforaciones poseen dimensiones variables entre 0.50 y 4.50 metros de diámetro, dispuestas según un gradiente paramétrico ajustado para maximizar la protección frente a la radiación solar directa y difusa, manteniéndose un equilibrio entre la transparencia visual y la sombra generada. La elección del diseño Voronoi se justifica por su capacidad comprobada para dispersar eficazmente la radiación solar incidente, reducir la acumulación térmica, y ofrecer una solución arquitectónica visualmente distintiva y funcional, alineada con principios sostenibles y adaptativos (Asghar et al., 2020; Trujillo Díaz, 2016).

## SIMULACIONES Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

Para evaluar cada estrategia, se utilizaron herramientas avanzadas de simulación computacional que combinaron modelos geométricos y climáticos con algoritmos de optimización e inteligencia artificial (Al-Shukri y Al-Majidi, 2020). En este proceso, se empleó Rhinoceros y su plugin nativo Grasshopper, que integran diferentes algoritmos de optimización como Ladybug, Galapagos y algoritmos desarrollados en GhPython Script. Las simulaciones se realizaron bajo las mismas condiciones climáticas, al tomar como referencia datos específicos del contexto de Madrid.

1. Modelado climático y trayectorias solares: Se incluyeron datos detallados sobre la radiación solar global y difusa, con valores promedio anuales y estacionales. Además, se modelaron las trayectorias solares diarias a lo largo de todo el año, se incorporó la inclinación característica de las latitudes mediterráneas. Para ello, se utilizó Ladybug, herramienta integrada en Grasshopper, que permitió un análisis detallado de los parámetros solares y su impacto en la edificación.
2. Evaluación energética: Se calcularon los niveles de radiación incidente por metro cuadrado en cada superficie del prisma. Estos cálculos se visualizaron, a través de mapas de densidad energética, que permitió una comparación detallada entre las estrategias. Los datos se procesaron con GPT4All, un modelo de inteligencia artificial de código abierto ejecutado localmente en un ordenador personal, sin conexión a internet ni dependencia de servicios externos como

Tabla 2. Análisis del modelo con parasoles horizontales por caras. Fuente: Elaboración de los Autores.

Cara	Superficie (m <sup>2</sup> )	Radiación (kWh/m <sup>2</sup> )	Reducción (%)
Sur	2500	1.608	46.0
Este	1500	0.682	48.7
Oeste	1500	0.717	48.7
Norte	2500	0.499	48.8
Superior	1500	2.298	0.0

ChatGPT o plataformas comerciales similares, lo que garantizó un análisis autónomo y reproducible.

- Optimización mediante algoritmos avanzados: Se implementaron algoritmos genéticos con Galapagos para optimizar la configuración de las protecciones solares, al seleccionar iterativamente las disposiciones más eficaces para reducir la radiación solar (Díaz Valdés, 2021). Métodos de aprendizaje automático, apoyados en GPT4All, complementaron el análisis, al predecir patrones de incidencia solar y sombras para simular con mayor precisión el comportamiento térmico de las fachadas. Asimismo, se desarrollaron scripts en GhPython para personalizar y ajustar los parámetros de optimización en función de los datos climáticos específicos de Madrid.

La selección de estas tres configuraciones surge de la necesidad de explorar distintas respuestas geométricas y funcionales al desafío climático planteado por la radiación solar en climas mediterráneos. El modelo horizontal se eligió por su simplicidad constructiva y eficacia frente al sol en posición alta; el inclinado por su flexibilidad adaptativa y mejor desempeño frente a ángulos solares variables; y el Voronoi por su carácter innovador y su capacidad para integrar criterios estéticos y funcionales mediante el uso de algoritmos paramétricos avanzados.

### PARÁMETROS DE ANÁLISIS

Se evaluaron los modelos considerándose los siguientes aspectos:

- Radiación solar total y difusa: Se calcularon valores anuales promedio, segmentados estacionalmente.
- Reducción porcentual de radiación: Comparación de efectividad respecto al modelo base.
- Distribución energética: Identificación de áreas críticas con mayor ganancia térmica.
- Impacto en confort térmico y eficiencia energética: Estimación de la reducción en el consumo energético asociado a la climatización.

Este enfoque integral permitió evaluar la efectividad de cada estrategia, que considere tanto su rendimiento energético como sus implicaciones arquitectónicas.

Además, sentó las bases para desarrollar soluciones sostenibles y adaptativas, alineadas con las condiciones climáticas mediterráneas.

## RESULTADOS DEL ANÁLISIS

### ESTRATEGIAS DE PROTECCIÓN SOLAR

El análisis comparativo de estrategias de protección solar se llevó a cabo sobre el modelo base representativo, con orientación paralela a los puntos cardinales. El edificio presenta una fachada sur completamente expuesta a la radiación directa, mientras que la fachada norte permanece en sombra la mayor parte del año. Las fachadas este y oeste reciben incidencia solar principalmente durante las mañanas y tardes, respectivamente, y la cubierta horizontal está expuesta a lo largo del día. Esta orientación se mantuvo constante en todas las simulaciones para garantizar la coherencia de los resultados.

Se evaluaron tres configuraciones: parasoles horizontales, parasoles inclinados individuales y celosías Voronoi, además de una estrategia híbrida que combinó las soluciones más eficientes de cada modelo. A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada propuesta.

La primera estrategia, basada en parasoles horizontales, logró una reducción del 68% de la radiación acumulada respecto al modelo sin protección, con un total de 3.04 kWh/m<sup>2</sup>. La cara sur experimentó una reducción significativa (46%), aunque la cubierta permaneció sin protección, al mantener sus niveles de exposición. La eficacia fue moderada en las fachadas este y oeste, con valores cercanos al 48%, gracias al sombreado constante de las lamas. Sin embargo, la falta de cobertura superior limitó la eficacia global del sistema, especialmente en entornos como Madrid donde la radiación cenital es elevada durante el verano.

Los parasoles horizontales (Figura 5) son efectivos en las caras verticales (sur, este, oeste y norte), ya que reduce la radiación de forma uniforme (Tabla 2). Sin embargo, la cara superior sigue expuesta a la radiación máxima, lo que limita la eficiencia global del modelo. La uniformidad en las reducciones de las caras este y oeste sugiere un diseño con separación constante, mejorable mediante ajustes en

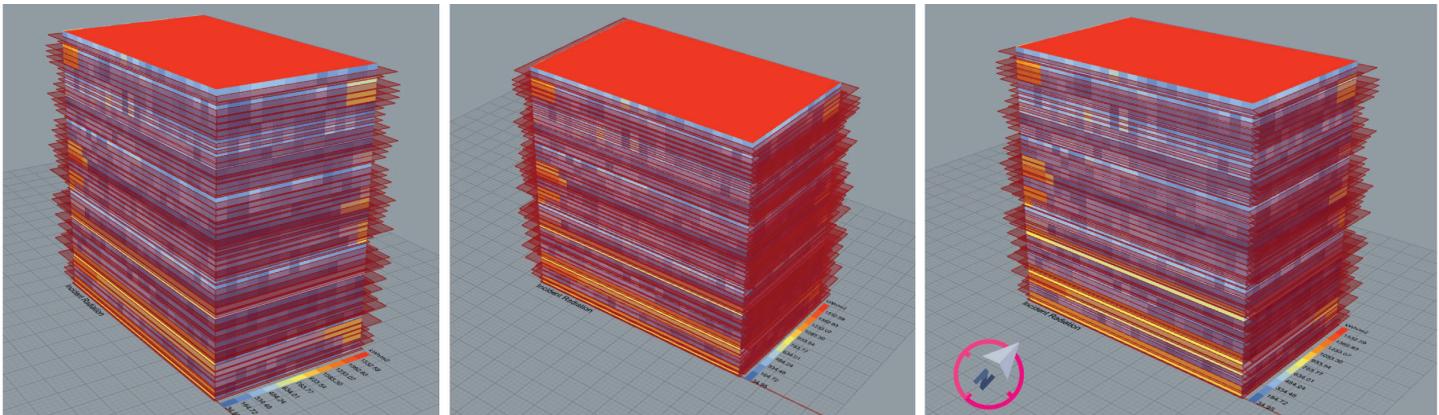


Figura 5. Diferencias de radiación por cara del prisma base con parasoles, destacándose las variaciones de exposición respecto a los valores extremos. Fuente: Elaboración de los Autores.

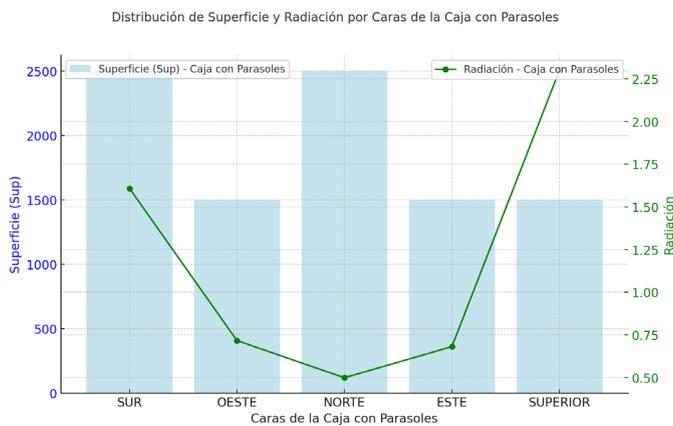


Figura 6. Distribución de superficie y radiación por cara de la caja con parasoles, que resalta la relación entre área expuesta y radiación recibida. Fuente: Elaboración de los Autores.

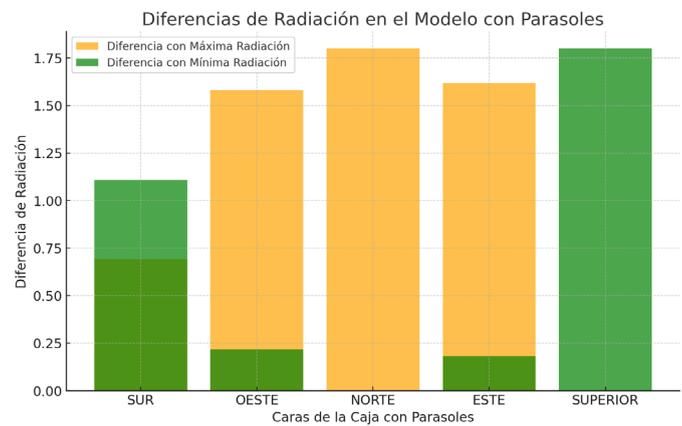


Figura 7. Diferencias de radiación en el modelo con parasoles, al comparar cada cara con los valores máximos y mínimos del conjunto. Fuente: Elaboración de los Autores.

Tabla 3. Análisis del modelo parasoles inclinados individuales por caras. Fuente: Elaboración de los Autores.

Cara	Superficie (m²)	Radiación (kWh/m²)	Reducción (%)
Sur	2500	0.471	84.2
Este	1500	0.293	77.9
Oeste	1500	0.301	78.5
Norte	2500	0.328	66.4
Superior	1500	0.830	63.9

densidad o longitud según las variaciones solares. Estos resultados destacan la necesidad de una protección integral que abarque todas las caras expuestas para optimizar el desempeño térmico y energético en climas mediterráneos (Figura 6 y Figura 7).

En la segunda estrategia, parasoles inclinados individuales, se observaron mejoras sustanciales. La radiación se redujo un 71.8% en comparación con el modelo base, acumulándose

solo 2.65 kWh/m². Esta estrategia fue especialmente eficaz en la fachada sur, donde logró una reducción del 84.2%, y en la cubierta, con una disminución del 63.9%. El diseño inclinado permitió una mejor adaptación a la trayectoria solar diaria y estacional, al generar zonas de sombra dinámicas sin comprometer la iluminación natural interior. Las reducciones fueron uniformes en todas las caras, confirmando el rendimiento superior de esta estrategia frente a soluciones tradicionales (Tabla 3).

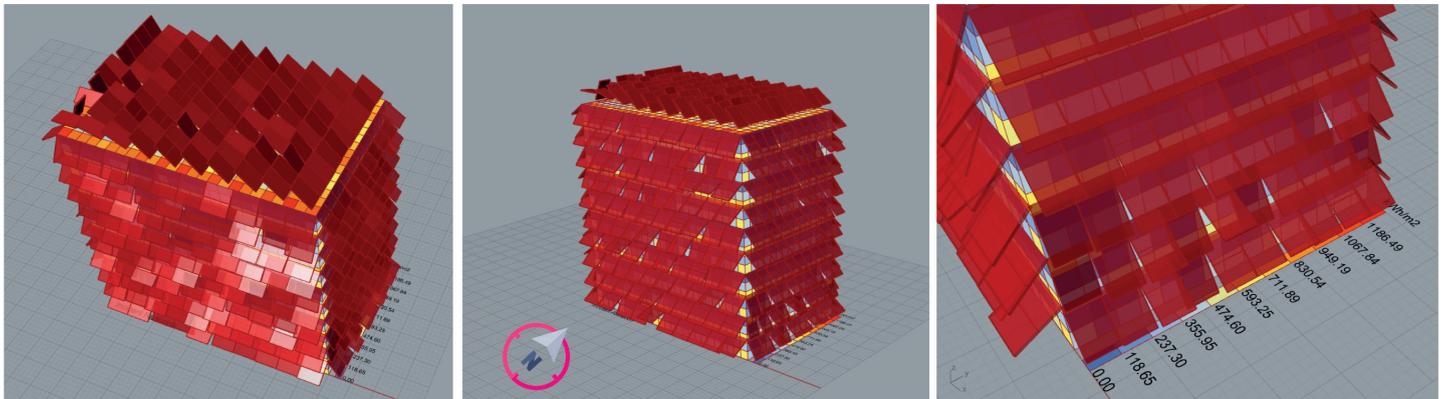


Figura 8. Diferencias de radiación por cara del prisma base con parasoles inclinados, comparándose cada una con los valores extremos y destaca las variaciones de exposición. Fuente: Elaboración de los Autores.

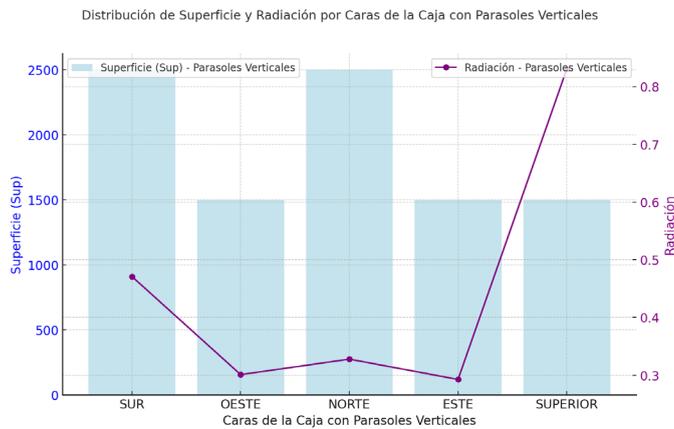


Figura 9. Distribución de superficie y radiación por cara del prisma con parasoles inclinados, destaca la interacción entre diseño y exposición solar. Fuente: Elaboración de los Autores.

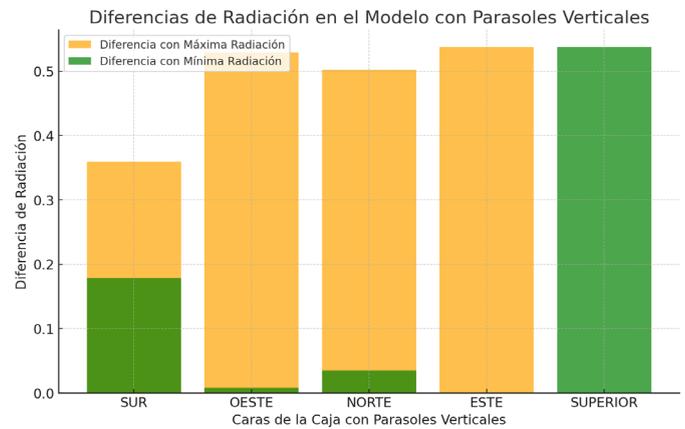


Figura 10. Diferencias de radiación en el modelo con parasoles inclinados, al comparar cada cara con los valores máximos y mínimos. Fuente: Elaboración de los Autores

Tabla 4. Análisis del modelo con parasoles voronoi por caras. Fuente: Elaboración de los Autores.

Cara	Superficie (m²)	Radiación (kWh/m²)	Reducción (%)
Sur	2500	0.706	76.3
Este	1500	0.324	75.6
Oeste	1500	0.329	76.4
Norte	2500	0.249	74.4
Superior	1500	0.249	89.1

En la cara sur, la reducción es especialmente notable, que refleja su eficacia para la orientación predominante en Madrid durante el verano (Figura 8). Además, la disminución en la radiación de la cara superior es significativa, un resultado que no se observa con los parasoles horizontales. Esto se debe al sombreado generado por los elementos verticales que proyectan sombra desde las caras laterales, lo que demuestra un diseño más estratégico y adaptado al contexto climático local (Figura 9 y Figura 10).

La tercera configuración evaluada fue una envolvente basada en patrones geométricos Voronoi, diseñada mediante algoritmos paramétricos con perforaciones de tamaño variable. Esta solución registró la mayor eficiencia individual, con una reducción total del 76.7% de la radiación (2.20 kWh/m²). La cara superior fue la más beneficiada, con una reducción del 89.1%, mientras que las caras verticales alcanzaron valores entre 74% y 76%. La geometría irregular y tridimensional permitió dispersar eficazmente la radiación, al combinar el control solar,

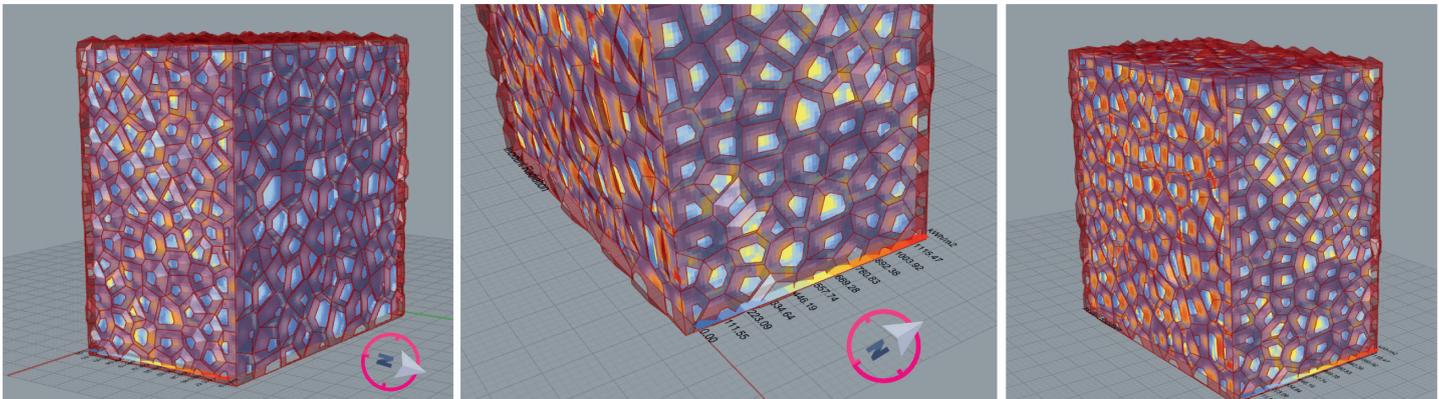


Figura 11. Diferencias de radiación por cara del prisma base con parasoles Voronoi, al comparar cada una con los valores máximos y mínimos observados. Fuente: Elaboración de los Autores.



Figura 12. Distribución de superficie y radiación por cara del prisma con protección Voronoi, que destaca la relación entre exposición y diseño geométrico. Fuente: Elaboración de los Autores.

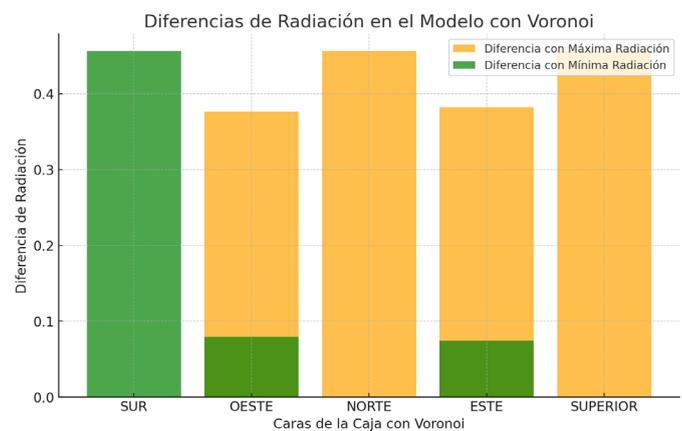


Figura 13. Diferencias de radiación en el modelo Voronoi, al comparar cada cara con los valores máximos y mínimos. Fuente: Elaboración de los Autores.

identidad formal y criterios estructurales bioinspirados (Tabla 4). No obstante, su complejidad constructiva podría suponer una barrera en contextos residenciales estándar, aspecto discutido más adelante (Figura 11).

El diseño Voronoi no solo reduce significativamente la radiación en todas las caras, sino que optimiza el confort térmico y la eficiencia energética del volumen interno. Su desempeño uniforme y la destacada reducción en la cara superior lo posicionan como la solución más innovadora y efectiva, adaptada a las condiciones climáticas del contexto mediterráneo (Figura 12 y Figura 13).

Finalmente, se desarrolló un modelo compuesto, al integrar los sistemas más eficaces por orientación: parasoles inclinados en las fachadas sur, este y oeste, y sistema Voronoi en la cara norte y en la cubierta (Figura 14). Este modelo híbrido logró una reducción total de 81.9% (1.62 kWh/m<sup>2</sup>), la más baja de todas las configuraciones analizadas. La cara sur, tradicionalmente la más crítica, se redujo a 0.35 kWh/m<sup>2</sup>, mientras que la cubierta descendió a 0.18 kWh/m<sup>2</sup>. Las caras este y oeste

se mantuvieron en valores alrededor de 0.23, lográndose una distribución equilibrada y una protección uniforme en todas las orientaciones (Figura 15 y Figura 16). Esta solución demostró una alta eficacia térmica y formal, con un nivel de optimización adaptable a distintos contextos climáticos del arco mediterráneo. La siguiente tabla (Tabla 5) resume los valores de radiación media anual por cara y la reducción porcentual respecto al modelo sin protección:

Los resultados confirman que el modelo compuesto supera las soluciones individuales al combinar lo mejor de cada una, adaptándose su respuesta a la geometría del edificio y la incidencia solar según orientación. Esta flexibilidad lo convierte en una alternativa óptima para edificaciones con múltiples fachadas expuestas en climas cálidos (Tabla 6).

La Figura 17 y Figura 18 correspondientes ilustran los patrones de radiación por cara y la morfología de cada estrategia, al facilitar la interpretación visual de los resultados y evidencia el impacto formal de

Tabla 5. Comparación de resultados de los diferentes modelos de parasoles. Fuente: Elaboración de los Autores.

Cara	Sin Parasoles kWh/m <sup>2</sup>	Horizontales kWh/m <sup>2</sup>	Verticales kWh/m <sup>2</sup>	Voronoi kWh/m <sup>2</sup>	Compuesto kWh/m <sup>2</sup>	Mejor Solución
Sur	2.98	1.61	0.47	0.71	0.35	Compuesto
Este	1.33	0.68	0.29	0.32	0.23	Compuesto
Oeste	1.40	0.72	0.30	0.33	0.23	Compuesto
Norte	0.98	0.50	0.33	0.25	0.23	Compuesto
Superior	2.30	2.30	0.83	0.25	0.18	Compuesto

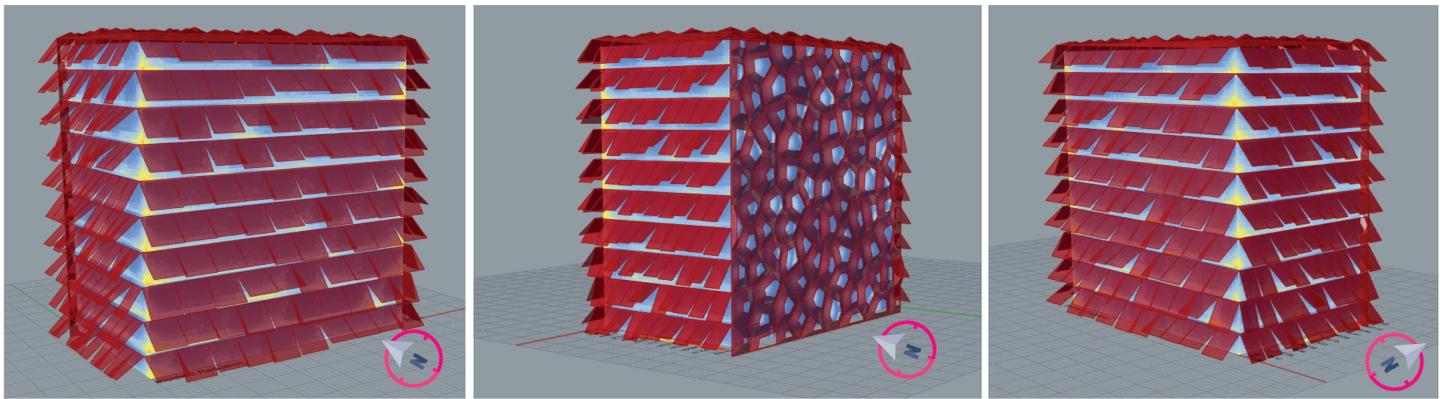


Figura 14. Modelo compuesto que integra parasoles inclinados en las fachadas Sur, Este y Oeste, debido a su alta exposición a la radiación solar directa, y un sistema geométrico basado en diagramas Voronoi en las superficies Norte y Superior, al optimizar tanto el control solar como la eficiencia energética global del edificio. Fuente: Elaboración de los Autores.

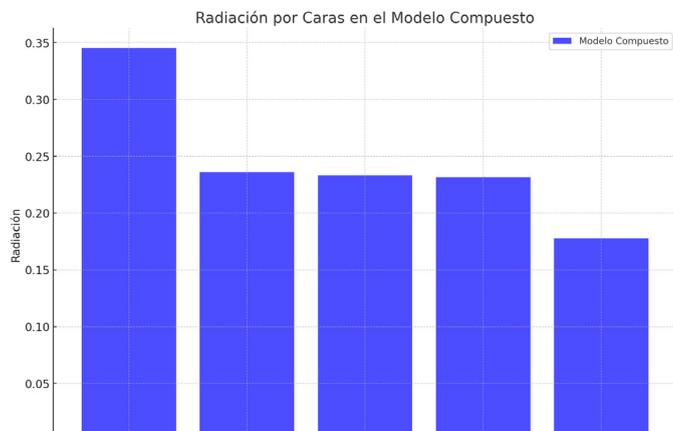


Figura 15. Radiación por cara en el Modelo Compuesto, que destaca una reducción significativa en todas las orientaciones. La cara SUR, aunque es la más expuesta, reduce su radiación a 0.345 unidades. Las caras ESTE y OESTE mantienen un nivel equilibrado alrededor de 0.233 unidades, mientras que la cara NORTE muestra una baja exposición con 0.233 unidades. La cara SUPERIOR registra la menor radiación, con solo 0.178 unidades, evidenciándose la eficacia del diseño combinado. Fuente: Elaboración de los Autores.

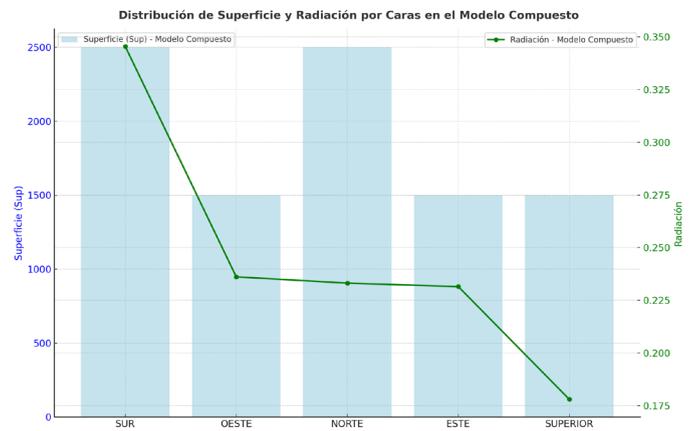


Figura 16. Distribución de la superficie por cara y los valores de radiación en el modelo compuesto, al destacar las variaciones de radiación según la orientación y exposición de cada cara. Fuente: Elaboración de los Autores.

Tabla 6. Comparación de resultados de los diferentes modelos de parasoles. Fuente: Elaboración de los Autores.

Modelo	Radiación Total (kWh/m <sup>2</sup> )	Reducción (%)
Sin Parasoles	8.98	—
Con Parasoles Horizontales	5.81	35.4%
Con Parasoles Verticales	2.65	70.5%
Con Voronoi	2.20	75.5%
Modelo Compuesto	1.62	81.9%

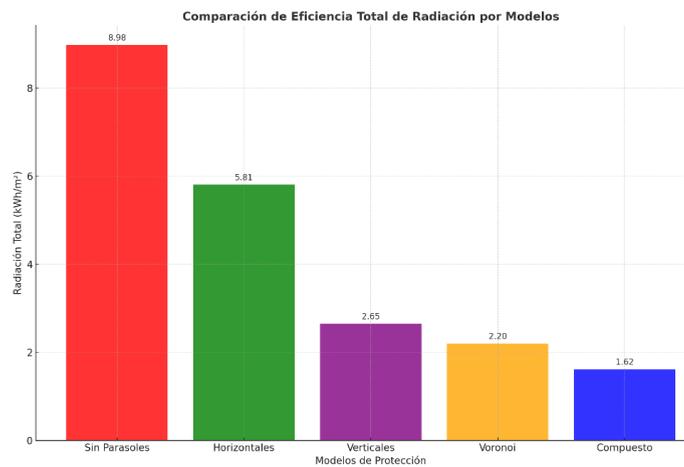


Figura 17. Comparación gráfica de la radiación total en los diferentes modelos evaluados. El gráfico destaca al modelo Sin Parasoles como el de mayor exposición, mientras que el modelo Compuesto se posiciona como la solución más eficiente, con la menor radiación acumulada. Fuente: Elaboración de los Autores.

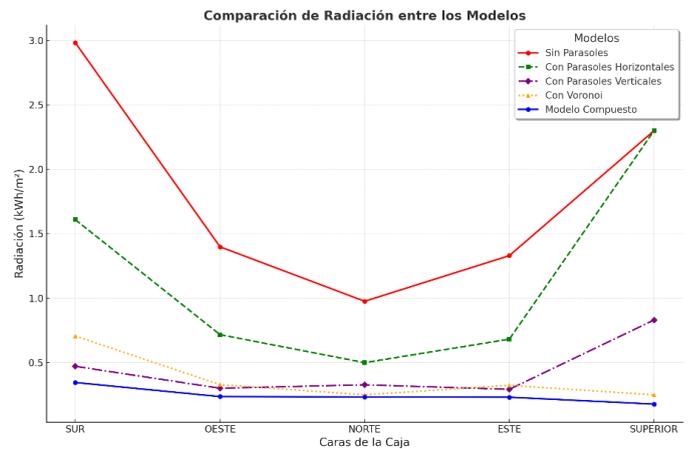


Figura 18. Gráfico comparativo que representa la radiación en las distintas caras de la caja para los cinco modelos. Fuente: Elaboración de los Autores.

cada propuesta. Se recomienda al lector observar en particular la progresión entre la estrategia Voronoi y el modelo compuesto, donde se logra una síntesis eficaz entre rendimiento térmico, estética arquitectónica y viabilidad técnica.

### VIABILIDAD CONSTRUCTIVA Y MATERIALIDAD DE LAS ESTRATEGIAS PROPUESTAS

Más allá del análisis computacional, resulta fundamental considerar la viabilidad constructiva de las estrategias propuestas. En particular, el modelo compuesto puede desarrollarse mediante tecnologías de fabricación digital actualmente disponibles, sin requerir sistemas complejos o exclusivos. Los parasoles inclinados son compatibles con soluciones modulares fabricadas en aluminio anodizado o acero galvanizado de bajo espesor, con anclajes estándar a fachada ventilada o estructura auxiliar. También podrían utilizarse paneles plásticos reciclables termoformados, adecuados para entornos de alta exposición solar. En cuanto a la envolvente Voronoi, su materialización es viable mediante corte CNC sobre chapa metálica, impresión

3D en polímeros técnicos o paneles compuestos tipo GFRP, según el grado de rigidez, curvatura y translucidez deseado. Estas técnicas permiten controlar el espesor, el patrón y el montaje de cada módulo, que facilitan la prefabricación y el ensamblaje en obra.

En proyectos institucionales o culturales, estas estrategias pueden implementarse con fidelidad geométrica total, mientras que en programas residenciales resulta viable adoptar versiones simplificadas que mantengan el principio de control solar adaptativo sin implicar sobrecostos. La clave reside en ajustar el grado de complejidad al programa y al presupuesto, manteniéndose la lógica morfológica optimizada que fundamenta cada solución.

Estudios recientes ya han documentado aplicaciones estructurales y morfológicas del patrón Voronoi en arquitectura, que demuestran su adaptabilidad y eficiencia tanto mecánica como formal. En particular, Agudelo Londoño et al. (2015) destacaron sus propiedades en la distribución de cargas y amortiguación de impactos,

mientras que Sora Yanquén (2007) y Flores Jurado et al. (2020) analizaron su potencial en la generación de superficies tridimensionales optimizadas, a través del diseño paramétrico. Más recientemente, Habib et al. (2024) y Bormashenko et al. (2021) han explorado nuevas clasificaciones y medidas de entropía en sistemas Voronoi, aplicadas al diseño de envolventes adaptativas y a la codificación de patrones naturales. Estas investigaciones confirman que la morfología Voronoi no solo tiene un valor estético o teórico, sino que ofrece un marco viable para el desarrollo de soluciones arquitectónicas materializables, sostenibles y estructuralmente coherentes.

## CONCLUSIONES

El estudio desarrollado demuestra que la integración de estrategias geométricas avanzadas con herramientas de simulación computacional permite optimizar de forma significativa la protección solar en edificaciones de clima mediterráneo. A través de un análisis riguroso y cuantitativo, se compararon distintas configuraciones que respondieron a condiciones reales del entorno urbano y climático de Getafe, dentro de la Comunidad de Madrid.

Los resultados evidencian que el modelo compuesto, que combina parasoles inclinados en las fachadas más expuestas y una celosía Voronoi en las superficies con radiación difusa o cenital, logra la mayor reducción de radiación acumulada, con una mejora del 81.9 % respecto al modelo sin protección. Esta solución se presenta como una propuesta equilibrada y replicable, capaz de adaptarse a diferentes orientaciones y condiciones de asoleamiento sin comprometer la estética ni el rendimiento energético del conjunto.

A diferencia de los sistemas horizontales, que si bien son fáciles de implementar no protegen eficazmente la cubierta, y de las envolventes Voronoi puras, cuya complejidad puede limitar su uso en proyectos residenciales convencionales, el modelo híbrido ofrece una alternativa pragmática y adaptable. Los elementos inclinados, al estar dispuestos según ángulos solares específicos, maximizan la sombra proyectada en las fachadas durante las horas críticas sin impedir la iluminación natural. Por su parte, el patrón Voronoi, aplicado exclusivamente en la cubierta y fachada norte, permite una optimización geométrica localizada con un fuerte potencial expresivo y técnico.

Tal como se ha expuesto previamente, estas estrategias pueden desarrollarse mediante sistemas constructivos modulares y tecnologías digitales accesibles, al ajustar su grado de complejidad en función del programa arquitectónico. Esta flexibilidad técnica abre nuevas posibilidades para su implementación tanto en contextos institucionales

como en programas residenciales de media escala, lo que permite soluciones de alto rendimiento con costes y mantenimiento controlados.

En términos proyectuales, el estudio confirma la necesidad de abandonar enfoques genéricos o estandarizados en protección solar, y avanzar hacia soluciones que integren diseño y simulación desde las etapas iniciales. El uso de algoritmos y análisis climático permite no solo mejorar la eficiencia energética, sino también enriquecer la expresividad arquitectónica sin sacrificar funcionalidad. La forma deja de ser un resultado estético arbitrario y pasa a ser consecuencia directa de la interacción entre geometría, clima y programa.

Aunque no se aborda en este artículo la fase de monitoreo post-ocupacional, se reconoce que el siguiente paso será evaluar la implementación real de estos sistemas en obras piloto, que identifiquen el comportamiento térmico en condiciones de uso cotidiano. Asimismo, se considera pertinente estudiar su aplicación en edificaciones de uso no residencial, como escuelas, bibliotecas o centros culturales, donde la flexibilidad funcional y la expresividad formal permiten una integración más libre de tecnologías avanzadas de control solar.

Finalmente, esta investigación no solo explora el impacto de los métodos paramétricos y bioinspirados en la arquitectura, sino que también resalta su papel en la transformación de la cultura proyectual contemporánea, al impulsar una visión más integrada y sistémica del diseño. Lejos de limitarse a una respuesta reactiva, la arquitectura debe asumir un rol proactivo, donde los modelos desarrollados no sean soluciones definitivas, sino catalizadores de una especulación crítica que entrelace estética, técnica y ética, que redefina la relación con el espacio, el tiempo y el entorno.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRedit

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

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco de las actividades de docencia e investigación desarrolladas en la Universidad Rey Juan Carlos (URJC), sin financiación específica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agghimien, E. I., Li, D. H. W., y Tsang, E. K.-W. (2022). Arquitectura bioclimática y su potencial de ahorro energético: Una revisión y direcciones futuras. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(2), 961–988. <https://doi.org/10.1108/ECAM-11-2020-0928>

Agudelo Londoño, T., Mejía Jiménez, I. C., y Rojas Acevedo, S. M. (2015). *Aplicaciones estructurales del diagrama Voronoi para la amortiguación de impactos partiendo del estudio del pericarpio y mesocarpio de los frutos cítricos* [Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana]. Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Pontificia Bolivariana. <http://hdl.handle.net/20.500.11912/3588>

Al-Shukri, N. A. H., y Al-Majidi, B. H. (2020). Algorithmic synergy and architectural form generation mechanisms. *Journal of Engineering*, 26(9), 114–136. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2020.09.08>

Amraoui, K., Sriti, L., Di Turi, S., Ruggiero, F., y Kaihou, A. (2021). Exploring building's envelope thermal behavior of the neo-vernacular residential architecture in a hot and dry climate region of Algeria. *Building Simulation*, 14(5), 1567–1584. <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0764-0>

Asghar, Q., Jalil, A., y Zaman, M. (2020). Self-organization analysed in architecture using Voronoi tessellation and particle systems. *Technical Journal*, 25(3), 1–10. <https://tj.uettaxila.edu.pk/index.php/technical-journal/article/view/1248>

Atef, E., Megahed, N., Elghezawy, D., y Nashaat, B. (2024). 'Adaptive office buildings: improving functional flexibility in response to shifting needs using kinetic technology'. *Architectural Engineering and Design Management*, 20(4), 946–971. <https://doi.org/10.1080/17452007.2024.2328119>

Betman, A., Balter, J., Hongn, M., y Ganem, C. (2023). Estudio paramétrico de sistemas de parasoles para reducción del consumo energético en climas con alta heliofania. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 27, 45-55. <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/4592>

Bertagna, F., Piccioni, V., y D'Acunto, P. (2023). Geometry-based graphical methods for solar control in architecture: A digital framework. *Frontiers of Architectural Research*, 12(4), 754-774. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2023.02.006>

Bormashenko, E., Legchenkova, I., Frenkel, M., Shvalb, N., y Shoval, S. (2021). Voronoi Entropy vs. Continuous Measure of Symmetry of the Penrose Tiling: Part I. Analysis of the Voronoi Diagrams. *Symmetry*, 13(9), 1659. <https://doi.org/10.3390/sym13091659>

Chen, Z. (2021). Application of environmental ecological strategy in smart city space architecture planning. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101684. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101684>

De la Hoz-Torres, M. L., Aguilar, A. J., Martínez-Aires, M. D., y Ruiz, D. P. (2024). Seasonal field study on thermal comfort in university classrooms in Mediterranean climate. *Indoor and Built Environment*, 33(8), 1380-1396. <https://doi.org/10.1177/1420326X241241530>

Díaz Valdés, M. (2021). Application of parametric design and digital fabrication: the solution for the current crises and emergencies. *Nexo Revista Científica*, 34(5), 45–55. <https://doi.org/10.5377/nexo.v34i05.13107>

Flores Jurado, M. V., Caiza Simbaña, M. J., Jácome Monar, E. P., Moya Jiménez, R., y Rivera Valenzuela, M. A. (2020). Diseño paramétrico: aplicación conceptual de la autopoiesis y diagramas de Voronoi a partir de la implementación del método adaptado de función de calidad. *Tecnología & Diseño*, (14), 21-37. <https://revistatd.azc.uam.mx/index.php/rtd/article/view/86>

Gamal, A., Nashaat, B., Shahda, M. M., y Nosier, S. R. (2024). Ten questions concerning the integration of digital fabrication techniques into the architectural design process. *Architectural Engineering and Design Management*, 20(1), 120–149. <https://doi.org/10.1080/17452007.2023.2269559>

García Molina, A., de la Hoz Torres, M. L., Aguilar, A. J., Nestares Nieto, B., y Bienvenido Huertas, D. (2024). The influence of global warming and tourism over the sleeping thermal comfort of dwellings in Granada. In M. Torres González y C. Rubio Bellido (Eds.), *Towards low and positive energy buildings* (pp. 225-238). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-70851-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-70851-0_12)

Google Maps. (2025). *Plaza España 6, Getafe, Madrid* [Mapa]. Google Maps. <https://www.google.com/maps>

Habib, F., Megahed, N. A., Badawy, N., y Shahda, M. M. (2024). D<sup>4</sup>G framework: a novel Voronoi diagram classification for decoding natural geometries to enhance the built environment. *Architectural Science Review*, 67(5), 437–464. <https://doi.org/10.1080/00038628.2024.2321584>

Jalali, S. M. J., Ahmadian, S., Kavousi-Fard, A., Khosravi, A., y Nahavandi, S. (2022). Automated deep CNN-LSTM architecture design for solar irradiance forecasting. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 52(1), 54–65. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2021.3093519>

Kolokotsa, D., Santamouris, M., y Yun, G. Y. (2022). Passive solar architecture. In T. M. Letcher (Ed.), *Comprehensive renewable energy* (2nd ed., pp. 725-741). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00094-7>

Ramos-Sanz, A. I. (2019). Transformación de la construcción y la arquitectura en los últimos veinte años: prospectivas y perspectivas. *Arquitecturas del Sur*, 37(55), 106-125. <https://doi.org/10.22320/07196466.2019.37.055.07>

Rodríguez-de-Ita, D., y Sosa-Compeán, L. B. (2024). Análisis de morfologías evolutivas con CFD: mejorar la ventilación natural en vivienda de patio central, en zonas semi cálidas de Latinoamérica. *Hábitat Sustentable*, 14(2), 48–59. <https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.02.04>

Sora Yanquén, G. E. (2007). Visualización de superficies en 3D por medio de diagramas de Voronoi [Licenciatura en Matemáticas, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio de la Universidad Industrial de Santander (UIS). <https://noesis.uis.edu.co/items/f8be51d5-06d8-4896-8f40-d2115cd31e76>

Tipán-Renjifo, D. M., y Tipán-Suárez, H. G. (2022). Hacia un diseño arquitectónico repensado desde los diagramas de Voronoi. *Educación y sociedad*, 20(1), 120-140. <https://revistas.unica.edu.co/index.php/edusoc/article/view/120-140>

Trujillo Díaz, A. (2016). Componente para el análisis de proximidad utilizando el diagrama de Voronoi para la plataforma GeneSIG [Tesis de Pregrado, Universidad de las Ciencias Informáticas]. Repositorio Digital Universidad de las Ciencias Informáticas. <https://repositorio.uci.edu/jspui/handle/123456789/8006>

Urias-Barrera, H. E. (2024). Comparativa y calibración de índices de confort para la temporada cálida en una ciudad semi-árida del noroeste de México. *Hábitat Sustentable*, 14(2), 20–31. <https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.02.02>

Wieser, M., López-Alonso, G., Flores, M.-F., Aquino, M., Guerra, F., y Moreno, P. (2024). Dimensionamiento de parasoles según zonas bioclimáticas en Perú. *Revista AUS*, (35), 90-98. <https://doi.org/10.4206/aus.2024.n35-10>

# ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN VIVIENDAS FAMILIARES: ESTUDIO BIBLIOMÉTRICO DE TEMAS EXPLORADOS, TENDENCIAS Y RETOS

Recibido 25/03/2025  
Aceptado 19/05/2025

## SOLAR PHOTOVOLTAIC ENERGY IN FAMILY DWELLINGS: A BIBLIOMETRIC STUDY OF ISSUES EXPLORED, TRENDS, AND CHALLENGES

## ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM RESIDÊNCIAS FAMILIARES: ESTUDO BIBLIOMÉTRICO DE TEMAS EXPLORADOS, TENDÊNCIAS E DESAFIOS

### **Amelia Eunice Maldonado-Lozano**

Doctora en Gestión Pública y Gobernabilidad  
Docente de la Escuela de Posgrado, programa Maestría en Ingeniería Civil con mención en dirección de empresas de la Construcción  
Universidad César Vallejo, Tarapoto, Perú  
<https://orcid.org/0000-0001-8137-1361>  
amaldonado@ucv.edu.pe

### **Jhonny Gárate-Ríos**

Doctor en Gestión Pública y Gobernabilidad  
Docente de la Escuela Internacional de Posgrado  
Universidad César Vallejo, Tarapoto, Perú  
<https://orcid.org/0000-0002-3062-6106>  
jgarater@ucvvirtual.edu.pe

### **Magda Ushiñahua-Ushiñahua**

Doctora en Gestión Empresarial  
Docente de la escuela de posgrado - Docente de la facultad de Ciencias Económicas de la Universidad Nacional de San Martín  
Universidad César Vallejo, Tarapoto, Perú  
<https://orcid.org/0009-0003-6773-1422>  
mushinahuau@ucvvirtual.edu.pe

### **Gladis Maribel Heredia-Baca**

Doctora en Gestión Empresarial  
Docente de la Escuela de Posgrado  
Universidad César Vallejo, Tarapoto, Perú  
<https://orcid.org/0000-0002-0677-6868>  
gherediab@ucvvirtual.edu.pe

### **Gabriela del Pilar Palomino-Alvarado**

Doctora en Gestión Universitaria  
Docente de la Facultad de Ciencias de la Salud  
Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú  
<https://orcid.org/0000-0002-2126-2769>  
gppalomino@unsm.edu.pe

### **Luis Paredes-Aguilar**

Doctor en Gestión Pública y Gobernabilidad  
Docente de la facultad de ingeniería y arquitectura  
Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú  
<https://orcid.org/0000-0002-1375-179X>  
luis.paredesaguilar@gmail.com



## RESUMEN

Este estudio analiza la evolución científica sobre energía solar fotovoltaica en viviendas familiares mediante un análisis bibliométrico basado en Scopus y herramientas como Bibliometrix y VOSviewer. Se examinaron 414 documentos publicados entre los años 2000 y 2024, se aplicó un enfoque cuantitativo y técnicas de visualización de redes. Los hallazgos evidencian un crecimiento sostenido desde el año 2008 y un auge desde 2016, impulsado por el interés global en energías renovables. Las principales contribuciones provienen de áreas como energía, ingeniería y ciencias ambientales, consolidándose "Applied Energy" y "Energies" como revistas clave. Conceptos como "solar energy" y "energy efficiency" dominan el campo, destacándose temas motores como almacenamiento de energía e integración de redes inteligentes, y emergentes como simulaciones energéticas. Se recomienda ampliar las fuentes de datos y explorar enfoques comparativos para mejorar la comprensión de los factores que afectan la adopción de esta tecnología.

### Palabras clave

energía solar, tecnología fotovoltaica, viviendas familiares, sostenibilidad

## ABSTRACT

This study analyzes the scientific evolution of solar photovoltaic energy in family dwellings using a bibliometric analysis based on Scopus and tools such as Bibliometrix and VOSviewer. 414 papers published between 2000 and 2024 were reviewed, employing a quantitative approach and network visualization techniques. The findings indicate sustained growth since 2008 and a notable surge since 2016, driven by global interest in renewable energies. The main contributions come from energy, engineering, and environmental sciences, with "Applied Energy" and "Energies" consolidated as key journals. Concepts such as "solar energy" and "energy efficiency" dominate the field, with topics like energy storage and smart grid integration standing out, as well as emerging areas like energy simulations. It is recommended that data sources be expanded and comparative approaches be explored to improve the understanding of the factors influencing the adoption of this technology.

### Keywords

solar energy, photovoltaic technology, family housing, sustainability

## RESUMO

Este estudo analisa a evolução científica da energia solar fotovoltaica em residências familiares por meio de uma análise bibliométrica baseada no Scopus e ferramentas como Bibliometrix e VOSviewer. Foram examinados 414 documentos publicados entre os anos 2000 e 2024, aplicando-se uma abordagem quantitativa e técnicas de visualização de redes. Os resultados evidenciam um crescimento sustentado desde 2008 e um auge desde 2016, impulsionado pelo interesse global em energias renováveis. As principais contribuições provêm de áreas como energia, engenharia e ciências ambientais, com a consolidação de "Applied Energy" e "Energies" como revistas-chave. Conceitos como "energia solar" e "eficiência energética" dominam o campo, com destaque para temas catalisadores como o armazenamento de energia e a integração de redes inteligentes, e temas emergentes como as simulações energéticas. Recomenda-se ampliar as fontes de dados e explorar abordagens comparativas para melhorar a compreensão dos fatores que afetam a adoção desta tecnologia.

### Palavras-chave:

energia solar, tecnologia fotovoltaica, residências familiares, sustentabilidade

## INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica ha emergido como una de las principales soluciones para abordar la creciente demanda de energía limpia y sostenible a nivel global. En un contexto marcado por la transición hacia economías descarbonizadas, las tecnologías fotovoltaicas han mostrado un enorme potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar los efectos del cambio climático. Particularmente, las aplicaciones en viviendas familiares han cobrado relevancia debido a su capacidad para promover la autosuficiencia energética, optimizar el consumo de electricidad y contribuir al bienestar económico de los hogares (Maghrabie et al., 2021; Cillari et al., 2021; Nykyri et al., 2022; Vahabi Khah et al., 2023). No obstante, estas iniciativas enfrentan retos significativos relacionados con las limitaciones tecnológicas, los altos costos iniciales de inversión y las barreras normativas que obstaculizan una adopción masiva (Liu et al., 2021b; Herrando et al., 2023; Shabbir et al., 2022).

A nivel global, las políticas climáticas y energéticas han desempeñado un papel crucial en el fomento de proyectos basados en energía solar fotovoltaica en viviendas. La implementación de estrategias como las comunidades energéticas y la generación distribuida en países de la Unión Europea ha promovido la integración de sistemas fotovoltaicos en entornos residenciales, lo que alcanzó resultados prometedores en términos de eficiencia y sostenibilidad (Gallego-Castillo et al., 2021; D'Agostino et al., 2022; Gamaleldine y Corvacho, 2022; García-Gáfaró et al., 2022). Sin embargo, las desigualdades regionales en términos de infraestructura y acceso a tecnologías renovables evidencian la necesidad de diseñar enfoques adaptados a las especificidades locales y a las capacidades socioeconómicas de cada región (Nematchoua et al., 2021; Hu et al., 2021; Cerezo-Narváez et al., 2021; Xue et al., 2021).

En este contexto, se plantea la pregunta de investigación: ¿Cuáles son los patrones y tendencias del abordaje científico en el tiempo sobre energía solar fotovoltaica en viviendas familiares? Esta interrogante busca dilucidar no solo la evolución de la producción científica, sino también las áreas prioritarias de investigación, los enfoques metodológicos predominantes y los factores que impulsan o limitan el avance en este campo; y de manera específica: 1) ¿Cuántos estudios se han publicado a lo largo de los años?, 2) ¿Quiénes son los autores más activos en el área?, 3) ¿Cuáles son las revistas más importantes relacionadas con el tema?, 4) ¿Desde qué áreas del conocimiento se han investigado?, 5) ¿Cuál es el desarrollo semántico alrededor del fenómeno en estudio?, 6) ¿Cuáles son los temas motores en torno al fenómeno en estudio, perspectivas, nichos, temas emergentes?, 7) ¿Cuáles son las raíces históricas del concepto o constructo central del tema en estudio? La literatura actual presenta una amplia variedad de perspectivas que abordan aspectos

como la gestión eficiente de energía, las tecnologías de almacenamiento y las interacciones entre los usuarios y los sistemas fotovoltaicos (Liu et al., 2021b; Alqahtani y Balta-Ozkan, 2021; Mascherbauer et al., 2022; Padovani et al., 2021).

En tal sentido, el estudio tiene como objetivo principal de conocer los patrones y tendencias del abordaje científico en el tiempo; además, evaluar el impacto de las fuentes académicas, determinar los principales autores, identificar las áreas del conocimiento desde donde se han investigado, explorar los temas más pertinentes, evaluar los enfoques metodológicos, identificar áreas potenciales para futuras investigaciones y establecer el origen del constructo principal del tema a investigar. Este estudio se justifica por la necesidad de comprender cómo ha evolucionado la investigación en energía solar fotovoltaica para viviendas familiares, que identifica patrones, tendencias y áreas de oportunidad para futuras exploraciones. Al proporcionar un análisis bibliométrico integral, se espera contribuir al fortalecimiento del conocimiento en este campo, que ofrece herramientas valiosas para investigadores, responsables de políticas públicas y profesionales que buscan acelerar la transición hacia energías renovables sostenibles.

Diversos estudios han destacado el impacto de las tecnologías complementarias en la mejora del rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. Por ejemplo, Liu et al. (2021a), Bakhavatchalam et al. (2022) y Heinz y Rieberer (2021) subrayan la importancia del almacenamiento energético mediante baterías y el uso de vehículos hidrógeno para garantizar una provisión continua de energía en comunidades residenciales. Asimismo, Maghrabie et al. (2021), Forrouso et al. (2024), Sadeghibakhtiar et al. (2024) y Sohani et al. (2023) resaltan las aplicaciones innovadoras de los sistemas fotovoltaicos integrados en edificios, que no solo mejoran la eficiencia energética, sino que también reducen los costos operativos y promueven la sostenibilidad a largo plazo. Estas investigaciones subrayan la necesidad de un enfoque multidisciplinario que integre perspectivas tecnológicas, económicas y sociales.

Por otro lado, estudios como el de Gallego-Castillo et al. (2021) y Masip et al. (2023) señalan que el éxito de la energía solar fotovoltaica en viviendas depende de un equilibrio adecuado entre regulaciones políticas y la aceptación social. El establecimiento de comunidades energéticas autónomas y el intercambio de energía entre usuarios han sido propuestas clave para fomentar la colaboración y reducir los costos de implementación. Además, investigaciones recientes destacan la necesidad de considerar los cambios climáticos futuros y su impacto en la viabilidad de los sistemas fotovoltaicos, lo que refuerza la relevancia de una planificación estratégica a largo plazo (Nematchoua et al., 2021; Neves et al., 2021).

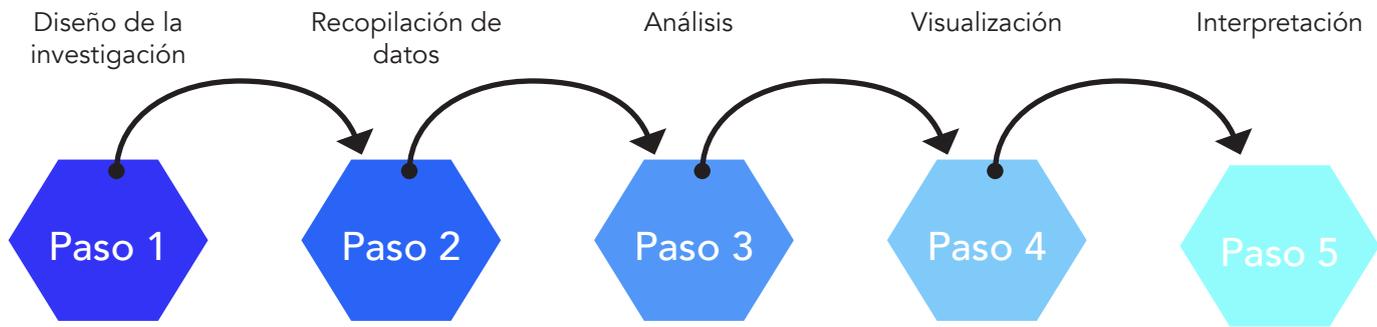


Figura 1. Pasos del modelo metodológico propuesto. Fuente: Elaborado por los Autores.

## METODOLOGÍA

La presente investigación cuantitativa se trata de un análisis bibliométrico, la misma que se ha utilizado en diferentes campos de estudio entre los investigadores (Aria y Cuccurullo, 2017), al mismo tiempo se empleó el modelo metodológico propuesto por Zupic y Čater (2014) que consiste en cinco pasos para su ejecución, los que son: i) diseño de la investigación; ii) recopilación de datos bibliométricos; iii) análisis; iv) visualización y v) interpretación (Figura 1).

### DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación, sobre energía solar fotovoltaica en viviendas familiares, examinó una serie de artículos académicos recopilados hasta el año 2024. El diseño de la investigación es no experimental de corte longitudinal que incorpora estudios desde el año 2000. Por esta razón, este estudio ofrece perspectivas significativas que pueden ayudar a tomar decisiones bien informadas sobre la energía solar fotovoltaica y viviendas familiares, en un panorama complejo y en constante evolución.

### RECOPIACIÓN DE DATOS BIBLIOMÉTRICOS

En el presente análisis bibliométrico se utilizó la base de datos Scopus, reconocida internacionalmente y que cuenta con aproximadamente 28 millones de resúmenes (Burnham, 2006), lo que la convierte en la base de datos más completa disponible. Al mismo tiempo, los parámetros de búsqueda se determinaron a partir de la información contenida en el título, el resumen y las palabras clave de las publicaciones, introduciéndose diversos términos de búsqueda relacionados con el tema de estudio, como "photovoltaic solar energy" o "solar panels" o "photovoltaic systems" o "solar power generation" o "photovoltaic technology" o "distributed solar energy"; y "family homes" o "residential homes" o "Single family homes" o "Family residences" o "Domestic homes" o "Residential buildings". Las palabras mencionadas se seleccionaron para mejorar la precisión, la relevancia y la concentración, al tiempo que se atendía a un amplio abanico de audiencias y puntos de vista; que facilitan

la obtención de resultados más pertinentes y permite explorar varias facetas de la energía solar fotovoltaica en viviendas familiares. La búsqueda inicial arrojó un total de 4,656 documentos que abarcan desde 2000 hasta noviembre de 2024. Cabe destacar que la estrategia de búsqueda limitó a acceso abierto, ya que se buscaba tener acceso a los artículos de investigación.

A continuación, se aplicaron filtros para mejorar los resultados, para ello la búsqueda se realizó en los títulos para los términos clave: TITLE-ABS-KEY ("Photovoltaic solar energy" OR "Solar Panels" OR "Photovoltaic systems" OR "Solar power generation" OR "Photovoltaic technology" OR "Distributed Solar Energy" ) AND TITLE-ABS-KEY ( "family homes" OR "Residential homes" OR "Single family homes" OR "Family residences" OR "Domestic homes" OR "Residential buildings" ), lo que dio como resultado un total de 414 registro pertinentes para la presenta investigación. Asimismo, se obtuvo los datos bibliométricos necesarios de la plataforma Scopus en formato de archivo CSV, el que incluye toda la información disponible, como el número de citas, los autores, el año de publicación, los títulos de las revistas y otros; al utilizar los datos en el estudio para obtener conclusiones y resultados pertinentes.

## RESULTADOS

En este apartado se exponen los resultados del análisis bibliométrico en relación con las preguntas de investigación planteadas, relacionadas con la energía solar fotovoltaica en viviendas familiares (Tabla 1).

A lo largo del periodo analizado, comprendido entre los años 2000 y 2024, se han publicado un total de 414 documentos, según los datos proporcionados. Este número refleja el esfuerzo continuo en la generación de conocimiento relacionado con el tema de estudio. Además, la tasa de crecimiento anual promedio es del 18.84% indica un incremento constante en la producción científica, lo que sugiere un interés creciente en la comunidad académica por explorar y abordar las áreas temáticas relacionadas. La información refleja una sólida actividad investigativa con un enfoque colaborativo,

Tabla 1. Información general. Fuente: Se utilizó metadatos, los indicadores se analizaron en bibliometrix al 2024.

Descripción	Resultados
<b>INFORMACIÓN PRINCIPAL SOBRE LOS DATOS</b>	
Periodo de tiempo	2000:2024
Fuentes (Revistas, Libros, etc.)	151
Documentos	414
Tasa de crecimiento anual %	18.84
Edad promedio del documento	3,57
Promedio de citas por documento	18.19
Referencias	16240
<b>CONTENIDO DEL DOCUMENTO</b>	
Palabras clave plus (ID)	2588
Palabras clave del autor (DE)	1302
<b>AUTORES</b>	
Autores	1444
Autores de documentos de un solo autor	20
<b>COLABORACIÓN ENTRE AUTORES</b>	
Documentos de un solo autor	21
Coautores por documento	3.86
Coautorías internacionales %	27.29

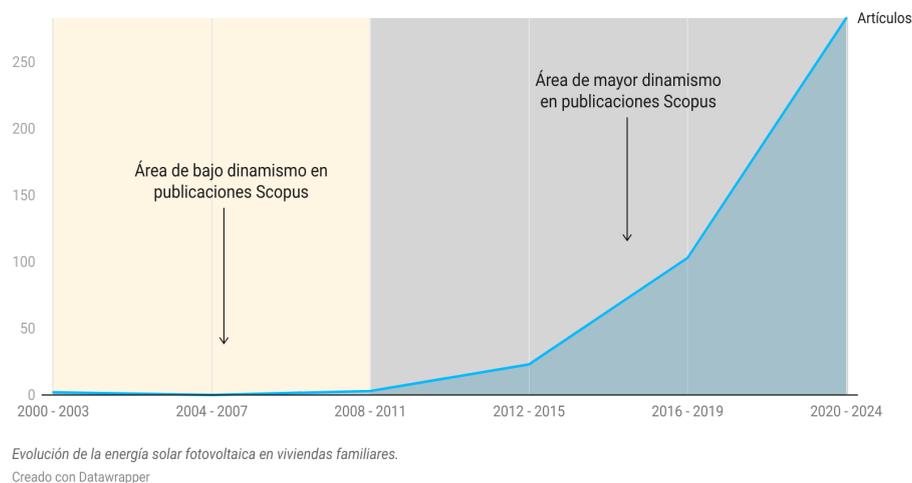


Figura 2. Cambios a lo largo del tiempo en la cantidad de publicaciones. Fuente: Elaborado por los Autores.

dado el promedio de 3.86 coautores por documento y una notable proporción de coautorías internacionales, que alcanza el 27.29%. Esto evidencia una tendencia hacia una mayor integración y cooperación global en los estudios publicados durante el periodo analizado.

La evolución de las publicaciones relacionadas con la energía solar fotovoltaica en viviendas familiares muestra un patrón interesante a lo largo del tiempo (Figura 2).

Entre los años 2000 y 2007 se observa un área de bajo dinamismo, con un crecimiento lento en la cantidad de artículos publicados. Este periodo refleja un interés inicial limitado o la etapa temprana de la investigación en este campo. A partir de 2008 hasta 2015, se percibe un incremento más sostenido, que marca una transición hacia un área de mayor dinamismo. Sin embargo, es entre 2016 y 2024 cuando se experimenta un crecimiento acelerado, que alcanza un pico significativo de publicaciones. Este

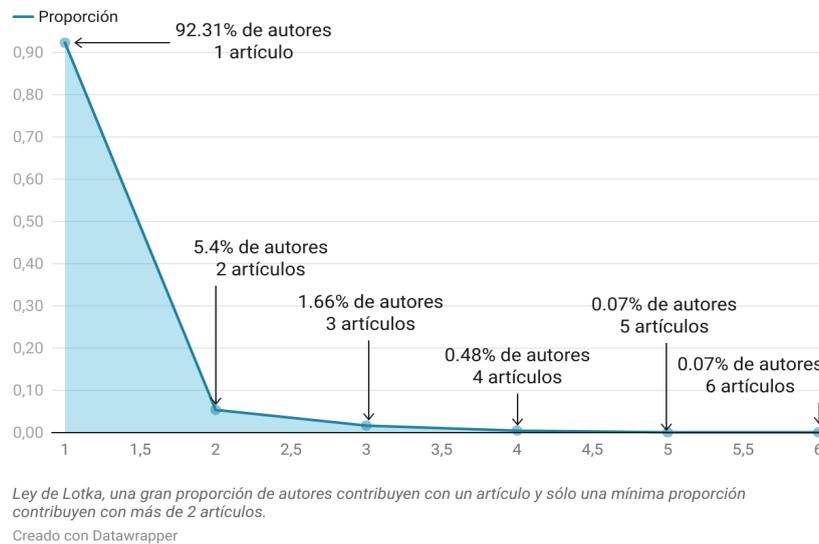


Figura 3. Observancia de la Ley de Lotka. Fuente: Elaborado al utilizar metadatos obtenidos de Scopus, indicadores analizados en bibliometrix y presentados mediante el uso del Datawrapper.

Tabla 2. Rendimientos de los 10 autores más destacados de la colección. Fuente: Elaborada utilizando metadatos obtenidos de Scopus, los indicadores fueron procesados en bibliometrix.

Autor	Índice h	Índice m	Total citas	Publicaciones	Año inicio publicaciones
ABDALLAH R	4	1.00	92	4	2021
ALBATAYNEH A	4	1.00	94	6	2021
ASIF M	4	0.40	164	4	2015
JUAI A	4	1.00	92	4	2021
MANZANO-AGUGLIARO F	4	1.00	92	4	2021
ABANDA FH	3	0.33	82	3	2016
CHRISTOFORIDIS GC	3	0.38	105	3	2017
DONG J	3	0.27	25	3	2014
ENONGENE KE	3	0.33	82	3	2016
KURUGANTI T	3	0.43	24	3	2018

Top 10 autores, medidos por índice h y m, desde el año de inicio de publicación

El aumento sugiere un interés global creciente en el tema, probablemente impulsado por la mayor conciencia ambiental, las políticas de sostenibilidad y los avances tecnológicos en energía solar fotovoltaica. En tal sentido, la gráfica también destaca que este campo de estudio ha ganado popularidad en los últimos años, con un incremento exponencial en la producción académica entre 2020 y 2024, lo que refleja su relevancia como un tema crítico dentro de los debates sobre energía renovable y sostenibilidad.

La figura 3 y la tabla 2 refuerzan el análisis basado en la Ley de Lotka, que establece que la mayoría de los autores contribuyen con un solo artículo, mientras que un pequeño porcentaje realiza múltiples aportaciones. En este caso, la distribución muestra que 1,333 autores (92.31%) han

publicado únicamente un artículo, lo que confirma que el esfuerzo investigativo en este campo se concentra en contribuciones puntuales. Esto podría deberse a la naturaleza emergente o interdisciplinaria del tema, que ha atraído a investigadores de diversas áreas que realizan una sola publicación relacionada con este ámbito. Asimismo, un número significativamente menor de autores, 78 (5.4%), han publicado dos artículos, mientras que solo 24 autores (1.66%) han contribuido con tres publicaciones. Este patrón decreciente continúa con solo siete autores publicando cuatro artículos y cifras casi marginales para aquellos que han publicado cinco o seis artículos, que representan cada uno el 0.07% de los investigadores.

Este comportamiento sugiere que, aunque el campo de estudio tiene un alcance amplio en términos de

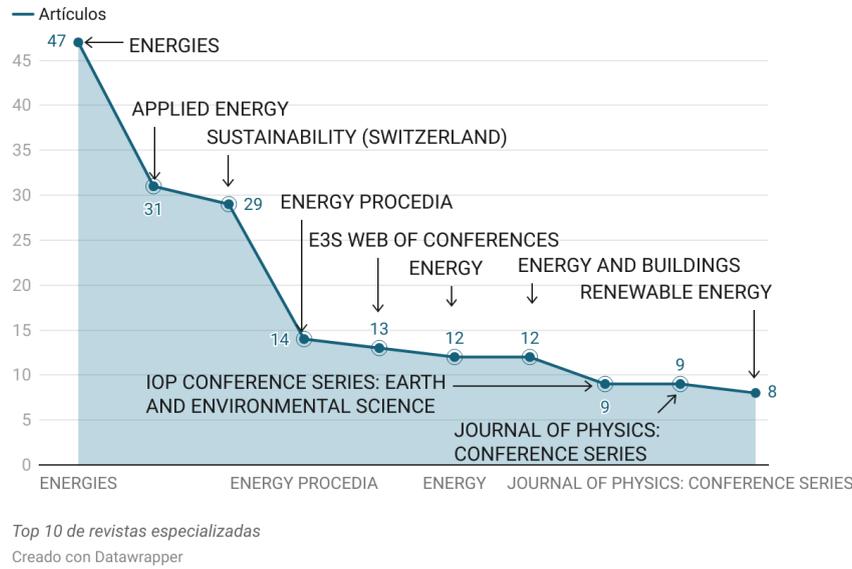


Figura 4. Observancia de la Ley de Bradford en relación con la productividad de las publicaciones periódicas. Fuente: Elaborado por los Autores, al utilizar metadatos obtenidos de Scopus, indicadores analizados en bibliometrix y presentados mediante el uso de Datawrapper.

participación, son pocos los investigadores que se especializan profundamente y realizan contribuciones recurrentes. Tal distribución no solo refleja la naturaleza dinámica del tema, sino también su capacidad para involucrar a investigadores de distintos contextos. Sin embargo, el bajo número de autores con múltiples publicaciones podría indicar una necesidad de consolidar comunidades de investigación más dedicadas al tema, lo que podría potenciar aún más el conocimiento acumulado y las innovaciones en este ámbito.

El análisis de la productividad de los 10 autores más destacados en el campo de la energía solar fotovoltaica en viviendas familiares, basado en los índices  $h$  y  $m$ , así como en las citas y publicaciones totales, evidencia contribuciones significativas en un rango de tiempo relativamente reciente. La mayoría de estos autores comenzaron a publicar entre 2014 y 2021, lo que refleja que este campo de estudio es relativamente nuevo y ha ganado tracción en los últimos años. Entre los autores, ALBATAYNEH A se destaca como el más prolífico, con seis publicaciones y 94 citas totales, al lograr un índice  $h$  de 4 y un índice  $m$  de 1.00, lo que indica un impacto constante y sostenido desde 2021. Otros autores como ABDALLAH R, JUAIDI A, y MANZANO-AGUGLIARO F también muestran un rendimiento similar con un índice  $h$  de 4 y un índice  $m$  de 1.00, junto con cuatro publicaciones cada uno, todas realizadas a partir de 2021. Este grupo de autores representa una contribución reciente y concentrada en términos de impacto académico.

Por otro lado, autores como ASIF M y DONG J presentan una trayectoria más extensa, ya que comenzaron a publicar en los años 2015 y 2014, respectivamente. ASIF M destaca con 164 citas en total, el mayor número entre los autores analizados, lo que sugiere que sus publicaciones

han tenido un impacto significativo en el campo. Sin embargo, su índice  $m$  de 0.40 indica un ritmo de citación más moderado en relación con el tiempo transcurrido. Y los autores como ABANDA FH y ENONGENE KE, con un índice  $h$  de 3 y un índice  $m$  de 0.33, han logrado una buena contribución con tres publicaciones cada uno desde 2016, al acumular 82 citas. En tanto, DONG J y KURUGANTI T tienen un impacto más limitado en términos de citas totales (25 y 24, respectivamente), lo que sugiere que su influencia en el campo podría ser más específica o estar todavía en desarrollo. En general, los datos reflejan un campo en expansión, con contribuciones significativas provenientes de autores que, en su mayoría, han comenzado a publicar en los últimos años. Esto sugiere una tendencia hacia el crecimiento y consolidación del conocimiento en torno a la energía solar fotovoltaica en viviendas familiares, impulsado por un conjunto de investigadores clave que lideran la producción académica.

La figura 4 ilustra la aplicación de la Ley de Bradford en la productividad de revistas relacionadas con la energía solar fotovoltaica en viviendas familiares, enfocándose en las revistas de la zona 1, consideradas como fuentes núcleo. Según esta ley, un pequeño número de revistas concentra la mayoría de las publicaciones en un área temática específica, lo que es evidente en esta gráfica. En este caso, la revista Energies se posiciona como la fuente principal, con 47 artículos publicados, lo que la convierte en el eje central de difusión científica en este campo. Su predominancia refleja su alta especialización y relevancia para los investigadores que trabajan en esta área. Otras revistas, como Applied Energy y Sustainability (Switzerland), también forman parte de este núcleo, con 31 y 29 artículos respectivamente.

Tabla 3. Productividad de las 10 revistas más destacadas, vinculadas a la colección. Fuente: Elaboración de los Autores. Tabla creada con metadatos obtenidos de Scopus, los indicadores fueron procesados en bibliometrix.

Fuente	Índice h	Índice m	Total citas	Publicaciones	Año inicio publicaciones
APPLIED ENERGY	23	2.30	1817	31	2015
ENERGIES	13	1.08	537	47	2013
SUSTAINABILITY (SWITZERLAND)	13	1.30	498	29	2015
ENERGY PROCEDIA	9	0.90	212	14	2015
ENERGY	8	0.50	281	12	2009
ENERGY AND BUILDINGS	8	0.80	270	12	2015
RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS	7	0.88	289	7	2017
RENEWABLE ENERGY	7	0.70	425	8	2015
ENERGY REPORTS	5	0.56	263	7	2016
IEEE ACCESS	5	0.71	159	7	2018

Top 10 revistas más importantes, medidas por el índice h y m, desde el inicio de su publicación

Sin embargo, aunque su contribución es menor que la de Energies, estas revistas siguen siendo fuentes esenciales, que representan plataformas de publicación confiables y de alto impacto para los estudios relacionados con la temática. A medida que se avanza hacia las siguientes revistas de la lista, como Energy Procedia (14 artículos) y E3S Web of Conferences (13 artículos), la productividad disminuye, lo que sigue el patrón esperado por la Ley de Bradford. Estas revistas, aunque relevantes, no alcanzan la misma densidad de publicaciones que las primeras tres, pero continúan siendo significativas dentro de la zona núcleo. En conclusión, la observancia de la Ley de Bradford en esta colección reafirma que un pequeño número de revistas concentra la mayor parte de las publicaciones relevantes. Esto sugiere que los investigadores tienden a preferir estas fuentes núcleo para maximizar la visibilidad y el impacto de sus trabajos, al consolidar su papel como actores clave en la disseminación de conocimiento en el ámbito de la energía solar fotovoltaica.

El análisis de la productividad de las 10 revistas más destacadas vinculadas a la colección (Tabla 3) muestra una clara heterogeneidad en cuanto a impacto y volumen de publicaciones. Applied Energy se posiciona como la revista más influyente, con un índice h de 23, el más alto de la lista, lo que refleja su capacidad para acumular un gran número de citas (1817 en total) provenientes de 31 publicaciones desde 2015. Su índice m de 2.30 indica un impacto constante a lo largo del tiempo. Por otro lado, Energies destaca por su volumen, con 47 publicaciones, la mayor cantidad entre las revistas analizadas, aunque con un índice h de 13 y un total de 537 citas, lo que sugiere un impacto más moderado en relación con su número de artículos. Su índice m de 1.08 refleja una contribución significativa, pero menos consistente en términos de

citas por año desde 2013. Revistas como Sustainability (Switzerland) y Energy Procedia tienen índices h de 13 y 9, respectivamente, con un inicio de publicaciones en 2015. Aunque Sustainability (Switzerland) tiene más publicaciones (29 frente a 14) y un mayor impacto relativo (índice m de 1.30 frente a 0.90), ambas revistas han demostrado ser importantes para el campo.

El caso de Energy es notable por ser la revista más antigua de la lista, que iniciaron sus publicaciones en el año 2009. Con un índice h de 8 y un total de 281 citas, su productividad es consistente, aunque su índice m de 0.50 refleja un ritmo más bajo de acumulación de impacto. Por su parte, Renewable and Sustainable Energy Reviews y Renewable Energy tienen índices h de 7, pero el primero acumula menos publicaciones (7 frente a 8) y un total de citas ligeramente menor (289 frente a 425). Esto podría indicar una especialización más dirigida de los artículos publicados en estas revistas. Finalmente, revistas como Energy Reports e IEEE Access, con índices h de 5 cada una, representan fuentes de menor volumen y antigüedad (desde 2016 y 2018, respectivamente). Sin embargo, su inclusión en esta lista refleja su relevancia emergente en el tema. En conjunto, estas revistas representan una mezcla de plataformas consolidadas y emergentes que, en su conjunto, contribuyen al desarrollo y difusión del conocimiento en energía solar fotovoltaica en viviendas familiares. La variabilidad en sus índices h, m y número de citas refleja diferencias en alcance, especialización e impacto dentro del campo.

La figura 5 muestra cómo las investigaciones sobre la energía solar fotovoltaica en viviendas familiares se distribuyen a lo largo de diversas áreas del conocimiento, al reflejar su carácter multidisciplinario. El mayor enfoque



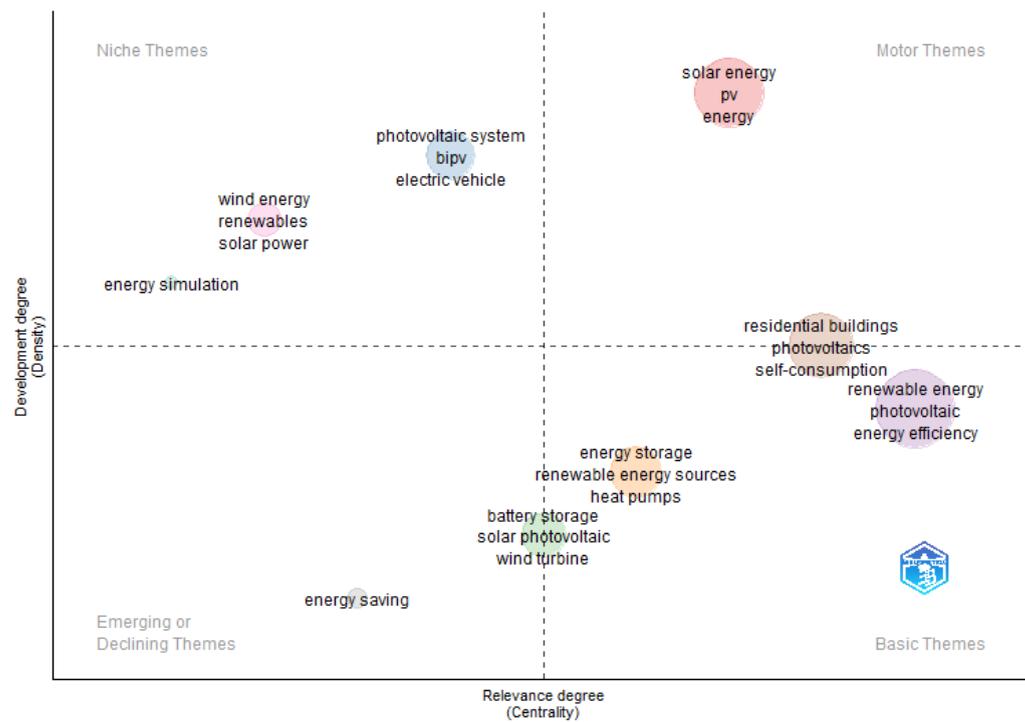


Figura 7. Mapa temático Fuente: Elaboración de los Autores utiliza metadatos obtenidos de Scopus, y los indicadores han sido analizados con Bibliometrix.

proviene del área de Energía, que representa el 28.4% de los documentos analizados. Este dato es coherente con la naturaleza del tema, ya que la energía solar fotovoltaica es una tecnología directamente relacionada con el sector energético, tanto en términos de generación como de eficiencia. La segunda área con mayor representación es Ingeniería, con un 23.5% de los estudios. Este enfoque resalta la importancia del diseño, implementación y optimización técnica de los sistemas fotovoltaicos, aspectos que son esenciales para su aplicación efectiva en viviendas familiares.

Las Ciencias ambientales ocupan el tercer lugar, con un 14.5% de las investigaciones. Esto subraya el interés en evaluar el impacto ambiental de la adopción de esta tecnología, así como su papel en la transición hacia sistemas de energía más sostenibles y ecológicos. Otras áreas como Matemáticas (8.5%) y Ciencias de la computación (6.5%) también tienen una participación relevante, que refleja el uso de modelos matemáticos y herramientas computacionales para optimizar el desempeño de los sistemas fotovoltaicos y analizar datos relacionados con su implementación. Las Ciencias sociales (5%) aportan una perspectiva valiosa al considerar factores como la aceptación social, el comportamiento de los usuarios y las políticas públicas que fomentan la adopción de esta tecnología.

Áreas más específicas, como Ciencia de los materiales (3.1%) y Ciencias de la Tierra y planetarias (2.8%), se enfocan en el desarrollo de nuevos materiales para paneles solares y en el análisis de las condiciones

geográficas y climáticas que influyen en su desempeño. Finalmente, Física y astronomía (2.5%) y Ingeniería química (1.5%) tienen menor representación, pero sus contribuciones son clave para entender los principios fundamentales y los procesos químicos involucrados en la conversión de energía solar. En general, la diversidad de áreas del conocimiento involucradas evidencia la complejidad del tema y su capacidad para atraer el interés de disciplinas técnicas, sociales y ambientales, lo que es fundamental para abordar de manera integral los desafíos y oportunidades que presenta la energía solar fotovoltaica en viviendas familiares.

El diagrama semántico presentado (Figura 6) ofrece una visión detallada de las principales áreas temáticas y conexiones conceptuales relacionadas con la investigación sobre energía solar fotovoltaica en viviendas familiares. Los clusters diferenciados por colores reflejan agrupaciones temáticas que representan las tendencias clave y los enfoques predominantes en este campo de estudio. El término central "photovoltaics" se encuentra en el núcleo del diagrama, con una fuerte conexión hacia áreas como "residential buildings," "solar energy," y "renewable energy." Esto sugiere que gran parte de la investigación está enfocada en integrar tecnologías fotovoltaicas en edificaciones residenciales, con un énfasis en su papel dentro del marco más amplio de la transición hacia energías renovables.

Luego, el cluster rojo, que abarca términos como "residential buildings," "solar energy," y "renewable energy," indica un enfoque predominante en la integración

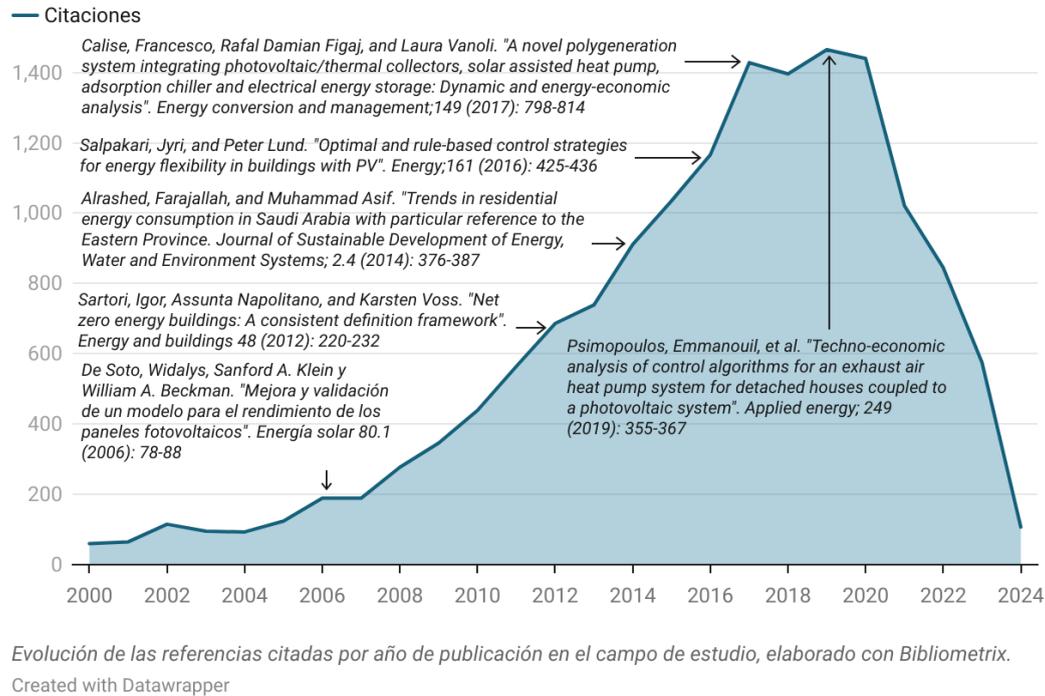


Figura 8. Espectroscopia del año de la fuente mencionada - Orígenes históricos del enfoque de la energía solar fotovoltaica en viviendas familiares. Fuente: Elaborado por los Autores, al utilizar metadatos obtenidos de Scopus, indicadores analizados en bibliometrix.

de energía solar en el sector residencial y su contribución a la sostenibilidad energética. La conexión con términos como "sustainability" y "climate change" subraya la relevancia ambiental y social de estas investigaciones. En el cluster verde, términos como "energy efficiency," "heat pumps," y "optimization" destacan un enfoque técnico en mejorar el desempeño y la eficiencia de los sistemas de energía solar fotovoltaica. Este grupo refleja el interés por optimizar tanto los recursos energéticos como los costos, junto con la incorporación de tecnologías complementarias como bombas de calor y redes inteligentes. El cluster azul, más periférico, incluye términos como "solar photovoltaic," "microgrid," y "wind energy," lo que sugiere una exploración interdisciplinaria que combina diferentes fuentes de energía renovable y su integración en microrredes. Este enfoque resalta la importancia de la diversidad energética y la descentralización en la generación de energía.

Los términos relacionados con "energy storage," "smart grid," y "demand-side management" sugieren una tendencia emergente hacia la gestión avanzada de la energía, que incluyen almacenamiento y optimización del consumo. Esto es esencial para maximizar el uso de la energía solar y abordar desafíos como la intermitencia y la estabilidad de las redes. En general, el mapa semántico evidencia un campo de investigación en expansión que combina aspectos tecnológicos, ambientales y sociales. Las conexiones entre los términos y clusters indican una tendencia hacia la integración de tecnologías fotovoltaicas en contextos residenciales, apoyada por avances en

eficiencia, almacenamiento, y gestión energética. Además, la inclusión de términos relacionados con sostenibilidad y cambio climático resalta la importancia global y estratégica de estas investigaciones.

La figura 7 proporciona una visión clara de la dinámica investigativa en torno a la energía solar fotovoltaica en viviendas familiares, al clasificar los temas según su relevancia (centralidad) y nivel de desarrollo (densidad). Esta organización permite identificar los enfoques predominantes, las áreas de investigación emergentes y aquellas que están en declive. Tal es así que, en el cuadrante superior derecho, que incluye los temas motores, se encuentran conceptos como solar energy, photovoltaics y energy efficiency. Estos temas tienen alta relevancia y desarrollo, ya que indican que son centrales para la investigación e impulsan el avance del campo. Su posición refleja su papel como pilares de la discusión científica, al destacar la integración de tecnologías fotovoltaicas con enfoques de eficiencia energética y su implementación en edificios residenciales.

Así también, en el cuadrante inferior derecho, que agrupa los temas básicos, incluye términos como renewable energy, energy storage y wind turbine. Estos temas son fundamentales para el campo, pero están menos desarrollados, lo que sugiere que sirven como base conceptual para investigaciones futuras. Su centralidad indica que son ampliamente conectados con otros temas, aunque podrían beneficiarse de una mayor profundización y especialización. Y, en el cuadrante superior izquierdo,

donde se sitúan los temas de nicho, se encuentran conceptos como photovoltaic system, BIPV (Building Integrated Photovoltaics) y electric vehicle. Estos temas tienen un alto grado de desarrollo, pero baja relevancia central, lo que sugiere que son áreas especializadas con potencial para convertirse en tendencias más amplias si logran una mayor conexión con las problemáticas centrales del campo.

Luego, en el cuadrante inferior izquierdo, que representa los temas emergentes o en declive, incluye términos como energy saving y energy simulation. Su baja centralidad y densidad sugieren que estas áreas, aunque pueden ser relevantes en contextos específicos, no están actualmente en el foco principal de las investigaciones. Esto podría indicar una disminución en el interés o la necesidad de reformular su conexión con los temas motores. En general, el mapa temático refleja un campo en evolución, donde los temas motores como la eficiencia energética y las tecnologías fotovoltaicas lideran las investigaciones, mientras que áreas relacionadas con el almacenamiento de energía y las energías renovables ofrecen bases para nuevas exploraciones. Por otro lado, los temas de nicho presentan oportunidades para avanzar en áreas especializadas, mientras que los emergentes o en declive podrían requerir reevaluación para mantener su relevancia.

La figura 8 muestra una evolución histórica de las citas relacionadas con investigaciones clave sobre energía solar fotovoltaica en viviendas familiares, se destacan documentos seminales que han marcado hitos en el desarrollo de este campo. Estos estudios reflejan la consolidación del conocimiento a lo largo del tiempo y el aumento de su relevancia en el ámbito académico. En tal sentido, el trabajo de Calise et al. (2017), lidera las citas con su enfoque innovador en sistemas de poligeneración que integran colectores fotovoltaicos/térmicos, bombas de calor solares y almacenamiento energético. Este estudio destaca por ofrecer soluciones dinámicas y económicamente viables para la gestión energética en edificios, al establecer un estándar para investigaciones posteriores en optimización y sostenibilidad.

Es así que, el documento de Salpakari y Lund (2016) se enfoca en estrategias de control basadas en reglas para mejorar la flexibilidad energética en edificios con sistemas fotovoltaicos. Este trabajo ha sido ampliamente citado debido a su contribución al desarrollo de enfoques prácticos y escalables para integrar tecnologías solares en la infraestructura residencial. Según, el artículo de Alrashed y Asif (2014) analiza el consumo energético residencial en Arabia Saudita, centrándose en los desafíos y oportunidades para implementar sistemas de energía renovable. Su relevancia radica en proporcionar un marco de referencia para la transición energética en regiones con altos niveles de irradiación solar. El estudio de Sartori et al. (2012), establece un marco consistente para

la definición de edificios de energía cero, un concepto clave para avanzar hacia viviendas más sostenibles. Este trabajo es fundamental para el diseño y planificación de infraestructuras que minimicen la dependencia de fuentes energéticas no renovables.

Y el trabajo de De Soto et al. (2006), se centró en el desarrollo y validación de modelos para evaluar el rendimiento de los paneles fotovoltaicos. Como uno de los primeros esfuerzos en este ámbito, sus hallazgos han servido como base para investigaciones más avanzadas en simulación y optimización de sistemas solares. Tal es así que, el artículo de Psimopoulos et al. (2019) realiza un análisis tecnoeconómico de algoritmos de control para bombas de calor acopladas a sistemas fotovoltaicos en viviendas unifamiliares. Este estudio combina perspectivas técnicas y económicas, al destacar su aplicabilidad en la vida real. Es decir, la tendencia ascendente de las citas hasta el año 2019 refleja un interés creciente y la consolidación de estas investigaciones como referencias esenciales. El posterior descenso puede indicar una transición hacia nuevas áreas de enfoque o la aparición de investigaciones más recientes que están comenzando a redefinir el campo. Estos trabajos han sido pilares fundamentales en la evolución de las tecnologías solares aplicadas a viviendas familiares, ya que sienta las bases para un futuro energético más sostenible.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación sobre la energía solar fotovoltaica en viviendas familiares reflejan patrones consistentes y algunas divergencias en comparación con los estudios previos citados en la literatura analizada. En cuanto a los indicadores principales, el incremento anual promedio del 18.84% en la producción científica observada desde el año 2000 hasta el 2024 converge con la tendencia global reportada por Gallego-Castillo et al. (2021), Hamed Banirazi Motlagh et al. (2023), Mustafa et al. (2022) y Rinaldi et al. (2021). Estos autores también identificaron un crecimiento exponencial en el interés académico hacia sistemas sostenibles, particularmente en regiones con alto potencial solar. Sin embargo, mientras estos estudios destacan el contexto geográfico como factor clave, el análisis realizado en la siguiente investigación enfatiza una mayor colaboración internacional con un 27.29% como motor principal de este crecimiento.

Respecto a la evolución de las publicaciones, los picos de productividad a partir del 2016 coinciden con un aumento global en políticas de sostenibilidad y tecnologías emergentes, como se observa en Fina et al. (2021), Wu et al. (2022). La distribución por áreas del conocimiento reafirma la naturaleza multidisciplinaria del campo, con la energía (28.4%) y la ingeniería (23.5%) que lidera la investigación. Esto está en línea con las tendencias

señaladas por De Soto et al. (2006), quienes subrayan la integración de conceptos de ingeniería y energía en el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas.

Los principales autores como por ejemplo, ABDALLAH R (Albatayneh et al., 2021; Albatayneh et al., 2022; Monna et al., 2022) y revistas identificados, como Applied Energy (Bayer y Pruckner, 2024; Johari et al., 2024; Ramadhani et al., 2024) y Energies (Constantinides et al., 2024; Ollas et al., 2024; Zaboli et al., 2024), se destacan como plataformas clave, al confirmar la aplicación de la Ley de Bradford. Este hallazgo coincide con el análisis de Sartori et al. (2012), que destaca estas revistas como pilares en la diseminación del conocimiento. Sin embargo, las diferencias en índices de impacto, como el índice h de Energies (13 frente a 23 de Applied Energy), sugieren disparidades en la relevancia académica entre los canales de publicación.

El desarrollo semántico de la temática revela clusters temáticos que integran “residential buildings” y “renewable energy”, alineándose con los enfoques de Psimopoulos et al. (2019). Este estudio también explora conexiones interdisciplinarias, aunque en menor profundidad, comparado con el amplio rango temático que nuestro análisis destaca. Los resultados de este estudio, que analizan los patrones y tendencias en la investigación sobre la energía solar fotovoltaica en viviendas familiares, encuentran convergencias y divergencias con investigaciones recientes. Estas comparaciones permiten contextualizar nuestros hallazgos dentro del panorama más amplio de la disciplina y extraer implicaciones clave.

Primero, los temas motores identificados en el mapa temático desarrollado, como “solar energy”, “photovoltaics” y “energy efficiency”, se alinean con el énfasis global en la integración de tecnologías renovables en viviendas familiares. Esto concuerda con el análisis de Sarker et al. (2023), que destaca la implementación de sistemas fotovoltaicos residenciales en Malasia como una estrategia clave para reducir costos de electricidad y emisiones de carbono; así también, se desataca la importancia del almacenamiento de energía para maximizar el autoconsumo de la energía producida (Ali Yildirim et al., 2023). Ambos estudios subrayan el papel de estas tecnologías como pilares en la transición energética. Sin embargo, el hallazgo acerca de los temas emergentes, como “energy saving” y “energy simulation”, carecen de integración teórica robusta, contrasta con estudios como el de Soomar et al. (2022), que exploran tendencias emergentes en la optimización de energía fotovoltaica para abordar limitaciones económicas y ambientales. Esto destaca una oportunidad de profundizar en estos temas mediante enfoques metodológicos más avanzados.

En términos de desafíos técnicos, investigaciones como las de Bandaru et al. (2021), que revisan la tecnología

fotovoltaica-térmica (PVT) en aplicaciones residenciales, resaltan limitaciones estructurales y financieras que coinciden con los obstáculos identificados en nuestros resultados; en ese sentido, los costos y la planificación de la infraestructura de almacenamiento y de la red son desafíos financieros y técnicos importantes (Nordgård-Hansen et al., 2022). Estos hallazgos refuerzan la importancia de una mayor innovación tecnológica para superar barreras críticas. Es así que, el análisis de la densidad colaborativa en la producción científica refleja la naturaleza interdisciplinaria del campo. Este resultado se complementa con la discusión de Tawalbeh et al. (2020), quienes evalúan los impactos ambientales de los sistemas fotovoltaicos y proponen diseños sostenibles para mitigar emisiones de gases de efecto invernadero; lo que se relaciona, con la aplicación de algoritmos de optimización metaheurística, como el Algoritmo del Lobo Gris Multiobjetivo (MOGWO), para determinar el tamaño óptimo de sistemas fotovoltaicos integrados en edificios (BIPV) y la capacidad de las baterías, con el objetivo de minimizar el Coste Nivelado de la Energía (LCOE) en diferentes climas, lo que demuestra la convergencia de la ingeniería de la energía solar con la ciencia de la computación y la optimización matemática (Behzadi et al., 2023). Ambos estudios enfatizan la relevancia de enfoques colaborativos para abordar problemas complejos.

La convergencia de los resultados con estos estudios recientes subraya el rol central de la energía solar fotovoltaica en la transición hacia modelos sostenibles de energía residencial. Sin embargo, la identificación de divergencias evidencia áreas que requieren mayor atención académica y técnica, que fortalece las bases para futuras investigaciones en este dinámico campo. Finalmente, las raíces históricas del concepto muestran convergencia con los hallazgos seminales de Calise et al. (2017), quienes establecen estándares en la optimización y viabilidad económica de los sistemas solares. Este análisis refuerza estos antecedentes al identificar un crecimiento sostenido en citas hasta el 2019, indica que su papel es fundamental en la consolidación del campo.

Las principales contribuciones de este estudio incluyen una visión integral de los patrones y tendencias en la investigación sobre energía solar fotovoltaica en viviendas familiares, se destacan áreas clave como la colaboración internacional, la multidisciplinariedad y la identificación de temas motores. Estas perspectivas son útiles para investigadores y responsables de políticas al delinear estrategias para la adopción de tecnologías renovables. No obstante, las limitaciones del estudio incluyen la dependencia de una única base de datos, lo que podría sesgar los resultados hacia los artículos indexados en Scopus. Además, el análisis de metadatos, aunque riguroso, podría beneficiarse de una triangulación con otras bases de datos como Web of Science para validar y enriquecer los hallazgos. Futuras

investigaciones podrían explorar el impacto de las tecnologías emergentes, como las redes inteligentes y el almacenamiento energético, en la adopción de sistemas fotovoltaicos en viviendas. Además, estudios comparativos entre países o regiones con diferentes grados de madurez tecnológica y políticas públicas podrían proporcionar ideas adicionales sobre los factores que impulsan o limitan la adopción de esta tecnología.

## CONCLUSIONES

El análisis bibliométrico realizado en esta investigación permite responder de manera integral a las preguntas planteadas, al proporcionar un panorama claro sobre los patrones y tendencias en la investigación de la energía solar fotovoltaica en viviendas familiares. En primer lugar, se identifica un crecimiento significativo y sostenido en la producción científica desde el año 2000, impulsado por la creciente atención hacia la sostenibilidad y la transición hacia energías limpias. Esta tendencia refleja un interés global que se concentra especialmente en las últimas dos décadas, y coincide con el avance de las tecnologías fotovoltaicas y las políticas ambientales internacionales.

Los autores más destacados en este campo presentan contribuciones recientes, con inicios de publicaciones predominantemente en la última década. Esto evidencia que el tema se encuentra en una fase de crecimiento y consolidación, que atrae a investigadores de diversos contextos y disciplinas. Sin embargo, la mayoría de los autores tienen una participación limitada en cuanto al número de publicaciones, lo que podría sugerir una falta de especialización sostenida en este ámbito específico.

Las revistas más influyentes, como *Energies* y *Applied Energy*, cumplen un papel central en la disseminación del conocimiento sobre energía solar fotovoltaica en viviendas. Estas plataformas concentran la mayor parte de las publicaciones relevantes, lo que refuerza la aplicación de la Ley de Bradford en el campo. La diversidad de índices de impacto entre estas revistas refleja diferencias en alcance y especialización, lo que proporciona opciones para investigadores con diversos enfoques.

El carácter multidisciplinario del campo es evidente en la distribución de las áreas del conocimiento que lo abordan, destacándose la energía, la ingeniería y las ciencias ambientales. Este enfoque diversificado permite abordar los complejos desafíos técnicos, sociales y ambientales que plantea la implementación de tecnologías fotovoltaicas en viviendas. Además, el desarrollo semántico refleja la interconexión de términos clave, como "sostenibilidad" y "eficiencia energética", con perspectivas emergentes que integran almacenamiento y redes inteligentes.

Finalmente, el análisis histórico muestra que los estudios seminales han establecido bases sólidas para el desarrollo

del campo, especialmente en áreas como la optimización de sistemas y la viabilidad económica. Estos trabajos han guiado las investigaciones posteriores, que marcan hitos en la comprensión y aplicación de las tecnologías solares en viviendas familiares. Este legado, combinado con la continua generación de conocimiento, asegura la relevancia del tema en los debates actuales sobre energías renovables.

Aunque los hallazgos de esta investigación son significativos, se deben reconocer algunas limitaciones. La dependencia de una sola base de datos, Scopus, puede limitar la amplitud del análisis y excluir perspectivas valiosas de otras fuentes. Además, el enfoque en metadatos deja fuera análisis cualitativos más profundos que podrían enriquecer la interpretación de los resultados. De cara al futuro, se recomienda expandir el análisis hacia bases de datos adicionales, como Web of Science, para una mayor representatividad y robustez de los resultados. Asimismo, las investigaciones futuras podrían enfocarse en estudiar el impacto de tecnologías emergentes, como redes inteligentes y almacenamiento energético, en el contexto residencial. Estudios comparativos entre países también aportarían perspectivas únicas sobre cómo las políticas locales y las condiciones socioeconómicas influyen en la adopción de estas tecnologías. En conjunto, estas acciones podrían fortalecer el entendimiento global y fomentar estrategias efectivas para acelerar la transición hacia energías limpias.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, A.E.M.L.; Curación de datos, J.G.R.; Análisis formal, J.G.R.; Adquisición de financiación; Investigación, A.E.M.L.; Metodología, J.G.R.; Administración de proyecto, G.M.H.B., M.U.U; Recursos, L.P.A.; Software, A.E.M.L.; Supervisión, G.del P.P.A.; Validación, J.G.R.; Visualización, G.M.H.B., M.U.U, L.P.A.; Escritura – borrador original, A.E.M.L.; Escritura – revisión y edición, J.G.R.

## AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento al Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú (Puno – Perú) por su invaluable colaboración y soporte durante el desarrollo de esta investigación, en el curso de Posdoctorado en Metodología de la Investigación y Producción Científica. Agradecemos especialmente al Dr. Wilson Sucari por sus valiosas aportaciones y comentarios que enriquecieron significativamente el presente trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albatayneh, A., Juaidi, A., Abdallah, R., y Manzano-Agugliari, F. (2021). Influence of the Advancement in the LED Lighting Technologies on the Optimum Windows-to-Wall Ratio of Jordanians Residential Buildings. *Energies*, 14(17), 5446. <https://doi.org/10.3390/en14175446>
- Albatayneh, A., Albadaine, R., Juaidi, A., Abdallah, R., Zabalo, A., y Manzano-Agugliari, F. (2022). Enhancing the Energy Efficiency of Buildings by Shading with PV Panels in Semi-Arid Climate Zone. *Sustainability*, 14(24), 17040. <https://doi.org/10.3390/su142417040>
- Ali Yildirim, M., Bartyzel, F., Vallati, A., Woźniak, M. K., y Ocoń, P. (2023). Efficient energy storage in residential buildings integrated with RESHeat system. *Applied Energy*, 335, 120752. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120752>
- Alqahtani, N., y Balta-Ozkan, N. (2021). Assessment of rooftop solar power generation to meet residential loads in the city of neom, Saudi Arabia. *Energies*, 14(13), 3805. <https://doi.org/10.3390/en14133805>
- Alrashed, F., y Asif, M. (2014). Trends in Residential Energy Consumption in Saudi Arabia with Particular Reference to the Eastern Province. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 2(4), 376–387. <https://doi.org/10.13044/j.sdwes.2014.02.0030>
- Aria, M., y Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Bakthavatchalam, B., Habib, K., Saidur, R., y Saha, B. B. (2022). Cooling performance analysis of nanofluid assisted novel photovoltaic thermoelectric air conditioner for energy efficient buildings. *Applied Thermal Engineering*, 213, 118691. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118691>
- Bandaru, S., Becerra, V., Khanna, S., Radulovic, J., Hutchinson, D., y Khusainov, R. (2021). A Review of Photovoltaic Thermal (PVT) Technology for Residential Applications: Performance Indicators, Progress, and Opportunities. *Energies*, 14(13), 3853. <https://doi.org/10.3390/en14133853>
- Bayer, D. R., y Pruckner, M. (2024). Data-driven heat pump retrofit analysis in residential buildings: Carbon emission reductions and economic viability. *Applied Energy*, 373, 123823. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123823>
- Behzadi, A., Alirahmi, S. M., Yu, H., y Sadrizadeh, S. (2023). An efficient renewable hybridization based on hydrogen storage for peak demand reduction: A rule-based energy control and optimization using machine learning techniques. *Journal of Energy Storage*, 57, 106168. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106168>
- Burnham, J. F. (2006). Scopus database: A review. *Biomedical Digital Libraries*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/1742-5581-3-1>
- Calise, F., Figaj, R. D., y Vanoli, L. (2017). A novel polygeneration system integrating photovoltaic/thermal collectors, solar assisted heat pump, adsorption chiller and electrical energy storage: Dynamic and energy-economic analysis. *Energy Conversion and Management*, 149, 798–814. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.027>
- Cerezo-Narváez, A., Piñero-Vilela, J.-M., Rodríguez-Jara, E.-Á., Otero-Mateo, M., Pastor-Fernández, A., y Ballesteros-Pérez, P. (2021). Energy, emissions and economic impact of the new nZEB regulatory framework on residential buildings renovation: Case study in southern Spain. *Journal of Building Engineering*, 42, 103054. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103054>
- Cillari, G., Franco, A., y Fantozzi, F. (2021). Sizing strategies of photovoltaic systems in nZEB schemes to maximize the self-consumption share. *Energy Reports*, 7, 6769–6785. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.117>
- Constantinides, A., Katafygiotou, M., Dimopoulos, T., y Kapellakis, I. (2024). Retrofitting of an Existing Cultural Hall into a Net-Zero Energy Building. *Energies*, 17(7), 1602. <https://doi.org/10.3390/en17071602>
- D'Agostino, D., Parker, D., Melià, P., y Dotelli, G. (2022). Optimizing photovoltaic electric generation and roof insulation in existing residential buildings. *Energy and Buildings*, 255, 111652. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111652>
- De Soto, W., Klein, S. A., y Beckman, W. A. (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, 80(1), 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.06.010>
- Fina, B., Roberts, M. B., Auer, H., Bruce, A., y MacGill, I. (2021). Exogenous influences on deployment and profitability of photovoltaics for self-consumption in multi-apartment buildings in Australia and Austria. *Applied Energy*, 283, 116309. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116309>
- Forrouso, S., Idrissi Kaitouni, S., Mana, A., Wakil, M., Jamil, A., Brigui, J., y Azzouzi, H. (2024). Optimal sizing of off-grid microgrid building-integrated-photovoltaic system with battery for a net zero energy residential building in different climates of Morocco. *Results in Engineering*, 22, 102288. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102288>
- Gallego-Castillo, C., Heleno, M., y Victoria, M. (2021). Self-consumption for energy communities in Spain: A regional analysis under the new legal framework. *Energy Policy*, 150, 112144. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112144>
- Gamaleldine, M., y Corvacho, H. (2022). Compliance with Building Energy Code for the Residential Sector in Egyptian Hot-Arid Climate: Potential Impact, Difficulties, and Further Improvements. *Sustainability*, 14(7), 3936. <https://doi.org/10.3390/su14073936>
- García-Gáfaró, C., Escudero-Revilla, C., Flores-Abascal, I., Hidalgo-Betanzos, J. M., y Erkoreka-González, A. (2022). A photovoltaic forced ventilated façade (PV-FVF) as heat source for a heat pump: Assessing its energetical profit in nZEB buildings. *Energy and Buildings*, 261, 111979. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111979>
- Hamed Banirazi Motlagh, S., Amin Hosseini, S. M., y Pons-Valladares, O. (2023). Integrated value model for sustainability assessment of residential solar energy systems towards minimizing urban air pollution in Tehran. *Solar Energy*, 249, 40–66. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.047>
- Heinz, A., y Rieberer, R. (2021). Energetic and economic analysis of a PV-assisted air-to-water heat pump system for renovated residential buildings with high-temperature heat emission system. *Applied Energy*, 293, 116953. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116953>
- Herrando, M., Coca-Ortegón, A., Guedea, I., y Fueyo, N. (2023). Experimental validation of a solar system based on hybrid photovoltaic-thermal collectors and a reversible heat pump for the energy provision in non-residential buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178, 113233. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113233>
- Hu, X., Xiang, Y., Zhang, H., Lin, Q., Wang, W., y Wang, H. (2021). Active-passive combined energy-efficient retrofit of rural residence with non-benchmarked construction: A case study in Shandong province, China. *Energy Reports*, 7, 1360–1373. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.02.045>
- Johari, F., Lindberg, O., Ramadhani, U. H., Shadram, F., Munkhammar, J., y Widén, J. (2024). Analysis of large-scale energy retrofit of residential buildings and their impact on the electricity grid using a validated UBEM. *Applied Energy*, 361, 122937. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122937>
- Liu, J., Chen, X., Yang, H., y Shan, K. (2021a). Hybrid renewable energy applications in zero-energy buildings and communities integrating battery and hydrogen vehicle storage. *Applied Energy*, 290, 116733. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116733>

- Liu, J., Yang, H., y Zhou, Y. (2021b). Peer-to-peer energy trading of net-zero energy communities with renewable energy systems integrating hydrogen vehicle storage. *Applied Energy*, 298, 117206. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117206>
- Maghrabie, H. M., Elsaid, K., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., y Olabi, A. G. (2021). Building-integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) systems: Applications and challenges. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101151. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101151>
- Mascherbauer, P., Kranzl, L., Yu, S., y Haupt, T. (2022). Investigating the impact of smart energy management system on the residential electricity consumption in Austria. *Energy*, 249, 123665. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123665>
- Masip, X., Fuster-Palop, E., Prades-Gil, C., Viana-Fons, J. D., Payá, J., y Navarro-Peris, E. (2023). Case study of electric and DHW energy communities in a Mediterranean district. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178, 113234. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113234>
- Monna, S., Abdallah, R., Juaidi, A., Albatayneh, A., Zapata-Sierra, A. J., y Manzano-Agugliaro, F. (2022). Potential Electricity Production by Installing Photovoltaic Systems on the Rooftops of Residential Buildings in Jordan: An Approach to Climate Change Mitigation. *Energies*, 15(2), 496. <https://doi.org/10.3390/en15020496>
- Mustafa, J., Almeahadi, F. A., Alqaed, S., y Sharifpur, M. (2022). Building a Sustainable Energy Community: Design and Integrate Variable Renewable Energy Systems for Rural Communities. *Sustainability*, 14(21), 13792. <https://doi.org/10.3390/su142113792>
- Nematchoua, M. K., Marie-Reine Nishimwe, A., y Reiter, S. (2021). Towards nearly zero-energy residential neighbourhoods in the European Union: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110198. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110198>
- Neves, R., Cho, H., y Zhang, J. (2021). Pairing geothermal technology and solar photovoltaics for net-zero energy homes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110749. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110749>
- Nordgård-Hansen, E., Kishor, N., Midttømme, K., Risinggård, V. K., y Kocbach, J. (2022). Case study on optimal design and operation of detached house energy system: Solar, battery, and ground source heat pump. *Applied Energy*, 308, 118370. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118370>
- Nykyri, M., Kärkkäinen, T. J., Levikari, S., Honkapuro, S., Annala, S., y Silventoinen, P. (2022). Blockchain-based balance settlement ledger for energy communities in open electricity markets. *Energy*, 253, 124180. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124180>
- Ollas, P., Thiringer, T., y Persson, M. (2024). Enhanced DC Building Distribution Performance Using a Modular Grid-Tied Converter Design. *Energies*, 17(13), 3105. <https://doi.org/10.3390/en17133105>
- Padovani, F., Sommerfeldt, N., Longobardi, F., y Pearce, J. M. (2021). Decarbonizing rural residential buildings in cold climates: A techno-economic analysis of heating electrification. *Energy and Buildings*, 250, 111284. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111284>
- Psimopoulos, E., Bee, E., Widén, J., y Bales, C. (2019). Techno-economic analysis of control algorithms for an exhaust air heat pump system for detached houses coupled to a photovoltaic system. *Applied Energy*, 249, 355–367. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.080>
- Ramadhani, U. H., Johari, F., Lindberg, O., Munkhammar, J., y Widén, J. (2024). A city-level assessment of residential PV hosting capacity for low-voltage distribution systems considering rooftop data and uncertainties. *Applied Energy*, 371, 123715. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123715>
- Rinaldi, A., Soini, M. C., Streicher, K., Patel, M. K., y Parra, D. (2021). Decarbonising heat with optimal PV and storage investments: A detailed sector coupling modelling framework with flexible heat pump operation. *Applied Energy*, 282, 116110. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116110>
- Sadeghibakhtiar, E., Naeimi, A., Naderi, S., Pignatta, G., y Behbahania, A. (2024). Size optimization of a stand-alone solar-wind-battery hybrid system for net zero energy buildings: A case study. *Energy and Buildings*, 313, 114204. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114204>
- Salpakari, J., y Lund, P. (2016). Optimal and rule-based control strategies for energy flexibility in buildings with PV. *Applied Energy*, 161, 425–436. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.036>
- Sarker, M., Haram, M., Ramasamy, G., Farid, F., y Mansor, S. (2023). Solar Photovoltaic Home Systems in Malaysia: A Comprehensive Review and Analysis. *Energies*, 16(23), 7718. <https://doi.org/10.3390/en16237718>
- Sartori, I., Napolitano, A., y Voss, K. (2012). Net zero energy buildings: A consistent definition framework. *Energy and Buildings*, 48, 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.032>
- Shabbir, N., Kutt, L., Astapov, V., Jawad, M., Allik, A., y Husev, O. (2022). Battery Size Optimization with Customer PV Installations and Domestic Load Profile. *IEEE Access*, 10, 13012–13025. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3147977>
- Sohani, A., Cornaro, C., Shahverdiyan, M. H., Moser, D., Pierro, M., Olabi, A. G., Karimi, N., Nižetić, S., Li, L. K. B., y Doranehgard, M. H. (2023). Techno-economic evaluation of a hybrid photovoltaic system with hot/cold water storage for poly-generation in a residential building. *Applied Energy*, 331, 120391. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120391>
- Soomar, A., Hakeem, A., Messaoudi, M., Musznicki, P., Iqbal, A., y Czapp, S. (2022). Solar Photovoltaic Energy Optimization and Challenges. *Frontiers in Energy Research* 10, 879985. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.879985>
- Tawalbeh, M., Al-Othman, A., Kafiah, F., Abdelsalam, E., Almomani, F., y Alkasrawi, M. (2020). Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. *Science of The Total Environment*, 759, 143528. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528>
- Vahabi Khah, M., Zahedi, R., Eskandarpanah, R., Mirzaei, A. M., Farahani, O. N., Malek, I., y Rezaei, N. (2023). Optimal sizing of residential photovoltaic and battery system connected to the power grid based on the cost of energy and peak load. *Heliyon*, 9(3), e14414. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14414>
- Wu, H., Deng, F., y Tan, H. (2022). Research on parametric design method of solar photovoltaic utilization potential of nearly zero-energy high-rise residential building based on genetic algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 368, 133169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133169>
- Xue, Y., Lindkvist, C. M., y Temeljotov-Salaj, A. (2021). Barriers and potential solutions to the diffusion of solar photovoltaics from the public-private-people partnership perspective – Case study of Norway. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110636. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110636>
- Zaboli, A., Kasimalla, S. R., Park, K., Hong, Y., y Hong, J. (2024). A Comprehensive Review of Behind-the-Meter Distributed Energy Resources Load Forecasting: Models, Challenges, and Emerging Technologies. *Energies*, 17(11), 2534. <https://doi.org/10.3390/en17112534>
- Zupic, I., y Čater, T. (2014). Bibliometric Methods in Management and Organization. *Organizational Research Methods*, 18(3), 429–472. <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>

# INTERVENCIONES ECOLÓGICAS PARA MEJORAR EL CONFORT TÉRMICO EN UN PATIO ESCOLAR EN AREQUIPA, PERÚ

## ECOLOGICAL INTERVENTIONS TO IMPROVE THERMAL COMFORT IN A SCHOOLYARD IN AREQUIPA, PERÚ

## INTERVENÇÕES ECOLÓGICAS PARA MELHORAR O CONFORTO TÉRMICO EM UM PÁTIO DE ESCOLA EM AREQUIPA, PERÚ

### **Katherin Geraldine Vilcanqui-Coaquira**

Bachiller en Arquitectura  
Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa, Perú  
<https://orcid.org/0009-0006-1577-0018>  
U18303357@utp.edu.pe

### **Patricia Carolina Delgado-Meneses**

Magíster en Business Administration  
Docente de la Facultad de Ingeniería  
Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa, Perú  
<https://orcid.org/0009-0000-2002-0517>  
C16692@utp.edu.pe

### **Valkiria Raquel Ibárcena-Ibárcena**

Magíster en Arquitectura Avanzada, Paisaje, Urbanismo y Diseño  
Docente Investigador de la Facultad de Arquitectura  
Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa, Perú  
<https://orcid.org/0000-0003-4985-0228>  
C19684@utp.edu.pe



## RESUMEN

Los patios escolares se han convertido en espacios residuales carentes de confort térmico debido al incremento de la edificación para cubrir la sobrepoblación estudiantil. Por ello, se simularon estrategias arquitectónicas ecológicas para demostrar su eficacia en el mejoramiento del confort térmico en Arequipa, Perú; a partir del análisis de la temperatura fisiológica estándar de niños. Se adoptó un enfoque mixto, que combinó el software Sun Path para el análisis de asoleamiento, en base al Protocolo SOPARC y mediciones in situ, con Rayman para la simulación de confort térmico y Revit y ENVI-met para comprobar las estrategias aplicadas. Los resultados evidencian la mejora de la sensación térmica, siendo notable, aquella intervención en la que se efectuó el cambio de pavimento de tierra a césped, adición de vegetación arbórea e implementación de un invernadero ecológico. Por lo que, esta investigación valida la optimización de las condiciones térmicas mediante un análisis previo y una posterior intervención mediante simulación.

### Palabras clave

confort térmico, ENVI-met, patio, microclima

## ABSTRACT

Schoolyards have become residual spaces lacking thermal comfort due to increased construction to accommodate student overpopulation. As a result, ecological architectural strategies were simulated to demonstrate their effectiveness in improving thermal comfort in Arequipa, Perú; based on an analysis of children's standard physiological temperature. A mixed-methods approach was used, employing Sun Path for solar analysis, based on the SOPARC Protocol, and on-site measurements. The results obtained in situ were then used with RayMan to verify the strategies applied in Revit and ENVI-met. Results show an improvement in thermal sensation, with the most notable intervention being the change from dirt to grass paving, the addition of tree vegetation, and the implementation of an ecological greenhouse. As such, this research validates the optimization of thermal conditions through prior analysis and subsequent intervention via simulation.

### Keywords

thermal comfort, ENVI-met, schoolyard, microclimate

## RESUMO

Pátio de recreação das escolas se tornaram espaços residuais com falta de conforto térmico devido ao aumento do estoque de edifícios para atender à superpopulação de alunos. Portanto, estratégias arquitetônicas ecológicas foram simuladas para demonstrar sua eficácia na melhoria do conforto térmico, analisando a temperatura fisiológica padrão das crianças. Foi adotada uma abordagem mista, combinando o software Sun Path para análise da luz solar, com base no Protocolo SOPARC e em medições in situ, com o Rayman para simulação de conforto térmico e o Revit e o ENVI-met para testar as estratégias aplicadas. Os resultados mostram a melhoria da sensação térmica, sendo notável aquela em que foi realizada a mudança do pavimento de terra para grama, a adição de vegetação arbórea e a implementação de uma estufa ecológica. Portanto, esta pesquisa valida a otimização das condições térmicas por meio de uma análise prévia e uma intervenção posterior por meio de simulação.

### Palavras-chave:

conforto térmico, ENVI-met, pátio, microclima

## INTRODUCCIÓN

Los patios escolares en la actualidad presentan reducciones de áreas verdes, que repercuten en el rendimiento académico de los niños (Bernardes y Vergara, 2017) que pasan mayor tiempo en las escuelas. Por otro lado, Binabid et al. (2024) indican que el aumento de temperaturas y el malestar térmico afectan las actividades y el uso de espacios abiertos en el sector educativo, especialmente en climas áridos y desérticos. Por ello, es crucial aplicar estrategias adaptativas locales para mitigar el impacto del cambio climático.

Debido a ello, Lanza et al., (2021) promueve la implementación de áreas verdes en patios escolares, ya que contribuyen a reducir la temperatura ambiental, a través de la sombra y evapotranspiración de la vegetación, lo que mejora el confort térmico humano. Mientras que, Duarte-Tagles et al. (2015) y Pasek et al. (2020) muestran la importancia de la interacción humana con la naturaleza al enfatizar sus beneficios en la calidad de vida y su influencia positiva en las funciones cognitivas, mentales, crecimiento emocional y estado de ánimo de los estudiantes.

Se ha visto que los patios son una solución de diseño pasivo para lograr arquitectura sostenible en zonas cálidas, como Los Emiratos Árabes (Salameh, 2024). Sin embargo, algunos colegios tradicionales, presentan losas de pavimento y asfalto (Akoumianaki-Ioannidou et al., 2016), lo que incrementa los niveles de desconfort térmico debido al cambio climático. En ese sentido, Namazi et al. (2024), analizaron las condiciones micro meteorológicas para identificar el impacto que tenían la vegetación y materiales, a partir de HOBO el que recoge datos de temperatura y humedad para realizar comparaciones entre suelo duro y blando, procesadas con FLIR Thermal Studio (Lindemann-Matthies y Köhler, 2019; Lanza et al., 2021; Namazi et al., 2024) para comparar modelos de confort térmico a partir de parámetros climáticos (Marchante González y González Santos, 2020).

Por otra parte, Mahmoud y Abdallah (2022) y Salameh (2024) emplean ENVI-met para diseñar (Jansson et al. 2018) y validar escenarios (Oregi et al. 2024) el que se complementa con el software Rayman para calcular el índice de temperatura fisiológica equivalente (PET) que mide la sensación térmica real al usar variables meteorológicas y de balance humano energético (Royé et al. 2012). Igualmente, Abdallah (2022) mediante la aplicación de cuestionarios para evaluar la percepción de los estudiantes. A diferencia de Lanza et al. (2021) y Lavilla Cerdán, (2013) quienes emplearon el método de observación para no afectar la conducta de los niños, mediante el Protocolo SOPARC, método que permite medir los niveles de actividad física y sus interacciones con elementos verdes. Mientras que Bates et al. (2018) mapeó los comportamientos al utilizar sistemas de información geográfica.

Por lo tanto, pocos estudios han validado la optimización del confort térmico con intervenciones virtuales. Debido a ello, esta investigación se enfoca en analizar las condiciones térmicas en un patio escolar de Arequipa, Perú; para aplicar diferentes estrategias con la finalidad de demostrar la mejora del PET en climas secos y cálidos mediante simulación.

## CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio está situado a una latitud sur 16°23'41.8", longitud oeste de 71°29'09.9" y altitud de 2649 m s. n. m. El clima de sierra es cálido y seco, con temperaturas máximas que oscilan entre 14°C y 29°C, y mínimas entre 5°C y 9°C (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2022). El entorno de la institución está rodeado de edificaciones de hasta 10 metros de altura. El estudio se realizó en septiembre del 2024, al final del invierno y el inicio de la primavera, lo que ofrece condiciones solares significativas pero tolerables, que permitieron un análisis representativo del comportamiento térmico y de sombra en espacios exteriores.

## METODOLOGÍA

El estudio presenta un enfoque mixto, en el que se analizan las condiciones climatológicas in situ, para luego aplicar las estrategias arquitectónicas ecológicas mediante simulación virtual (Figura 1). Se realizó un análisis de asoleamiento con el software Sun Path y tres fuentes de pronóstico climático: *The Weather Channel* (2024), *Tiempo3* (2024) y *Meteo Consult* (2024), se optó por pronósticos en lugar de archivos TMY, dado que estos últimos representan datos promedio y no corresponden a días reales específicos, se identificó el día más soleado y horarios para la medición in situ. Los puntos de medición fueron seleccionados según las características espaciales, materialidad y desniveles en los patios. Luego, se utilizó el protocolo SOPARC para registrar las actividades y desplazamientos de los 203 estudiantes durante su recreo de 30 minutos. Para las mediciones de temperatura (bulbo seco) se usó un termohigrómetro digital TA318 con sonda externa que mide rangos de -50°C a 70°C con precisión de ±1°C y de humedad relativa del 25% al 98% con una precisión de ±5% HR. La velocidad del viento se obtuvo del anemómetro digital Hobotest HT605, con rango de medición: 0~30m/s y precisión de +/-2 %. A partir de esta data, más el PET analizado por SOPARC (protocolo) y Rayman (software), se calculó la sensación térmica para niños de 6 y 11 años, y se simuló intervenciones arquitectónicas ecológicas modeladas en SketchUp. Posteriormente, se evaluaron los efectos en el confort térmico mediante simulaciones con el software ENVI-met.

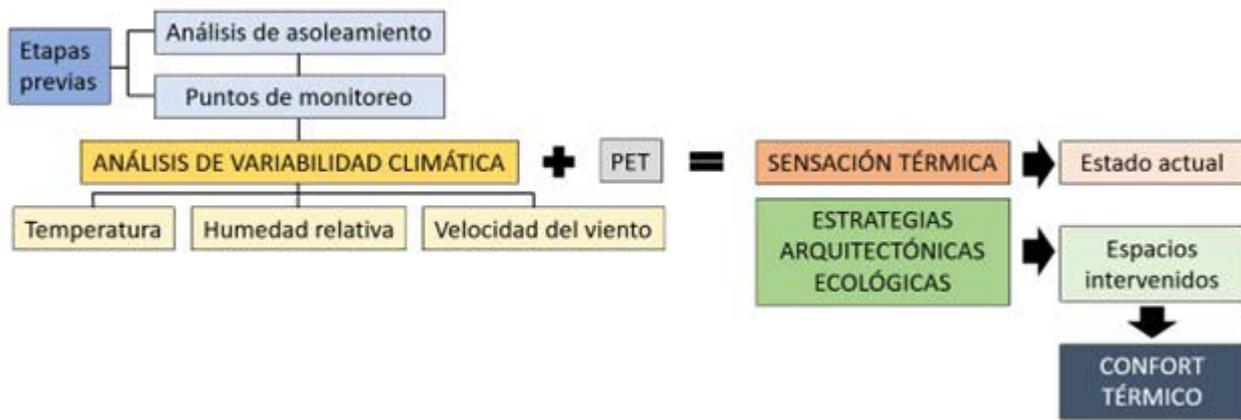


Figura 1. Diseño metodológico. Fuente: Elaboración de los Autores.

## ANÁLISIS DE ASOLEAMIENTO

Con la utilización del software Sun Path, se definieron los horarios de medición. A las 8:00 a. m., el sol asciende, generándose una sensación térmica cálida; a las 10:30 a. m., la radiación solar incrementa, exponiéndose a gran parte del patio al sol; y a la 1:30 p. m., con el descenso solar, se reduce la radiación y la percepción térmica. Además, se observa que las edificaciones circundantes no proporcionan sombra al patio (Figura 2).

### Ubicación de puntos de monitoreo

Se seleccionaron 6 puntos (Figura 3) basados en sus características espaciales, materialidad y desniveles. P1 y P2 están en el nivel más alto, con césped natural; P1 tiene protección natural por árboles, y P2 por cubierta artificial. P3 y P4 se encuentran al mismo nivel, con tierra natural. Sin embargo, P3 posee 30% de cobertura solar e incluye una senda de piedras que permite recorrer el huerto compuesto de área verde y P4 carece de cobertura solar. Finalmente, P5 y P6 son losas deportivas con características similares, diferenciadas por su tamaño.

Los sensores se colocaron a 1.5 metros sobre el nivel del suelo, se siguieron las recomendaciones de la CIBSE *Guide A: Environmental Design* (CIBSE, s.f.), dado que es una altura representativa del nivel del usuario. Además, los sensores expuestos al sol fueron P1, P3 y P4 y a la sombra fueron P2, P5 y P6, donde existen elementos de protección solar (Figura 4). La selección de estos puntos responde a la necesidad de representar condiciones contrastantes del espacio, que permiten una evaluación precisa del comportamiento térmico en el patio.

Se utilizó el protocolo SOPARC al que se le adicionó un registro fotográfico en simultáneo que permitiera reconocer el desplazamiento de 203 niños durante 30 minutos, que es el tiempo que dura el juego no estructurado bajo la supervisión del docente, lo que

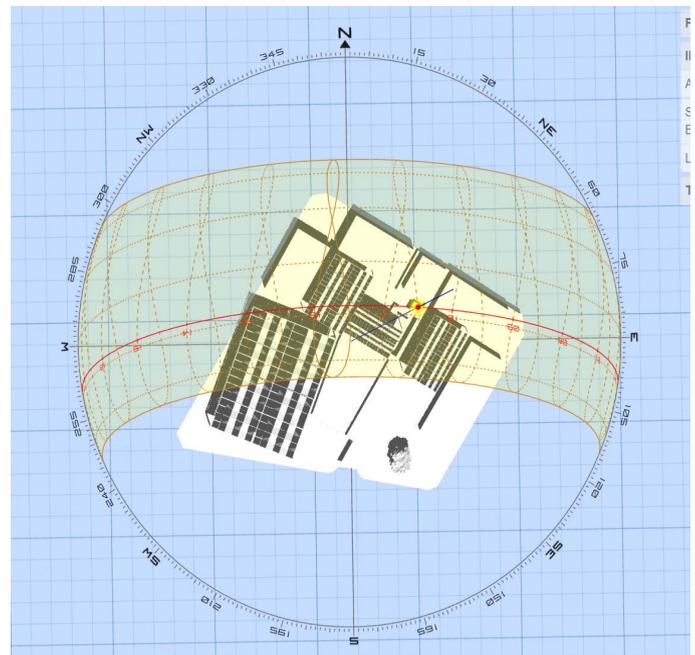


Figura 2. Asoleamiento a las 10:30 a. m. Fuente: Elaboración de los Autores en base a Sun Path.

permitió identificar las zonas más concurridas y preferidas por ellos, basándose en indicadores de ubicación, género, actividad primaria, nivel de actividad e interacción con elementos verdes.

Como se observa en la Figura 5, P1 y P2 no se encuentran registrados al ser áreas exclusivas para el nivel inicial, por lo que el lugar más utilizado para los niños de 6 a 11 años es el P5 seguido del P6 al contener losas deportivas que son la actividad primordial para estos mismos (a). Cabe indicar que la muestra de estudio tiene una proporción similar entre el género masculino y femenino (b), al ser la actividad predominante el jugar, seguido de socializar cuyo espacio tiene graderías lo que fomenta la reunión en grupo y correr (c).



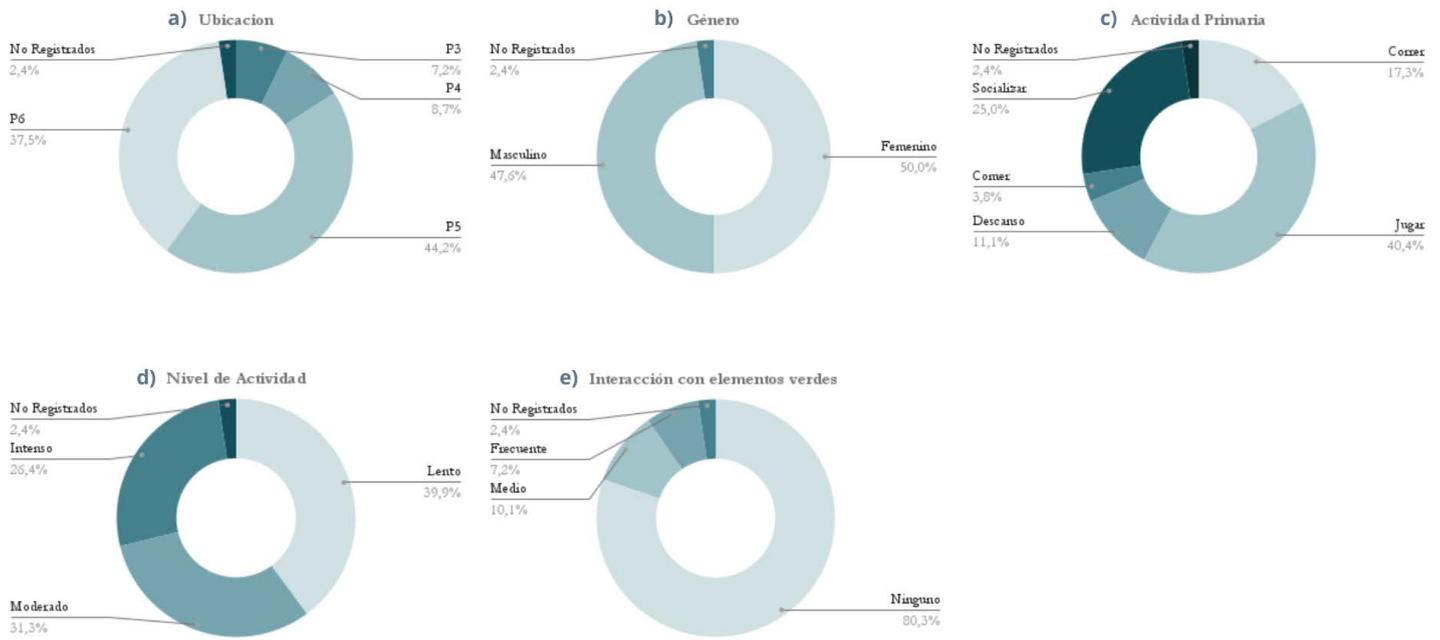


Figura 5. Indicadores basados en el protocolo SOPARC. Elaboración de los Autores.



Figura 6. Flujos de movimiento y nivel de actividad. Fuente: Elaboración de los Autores.

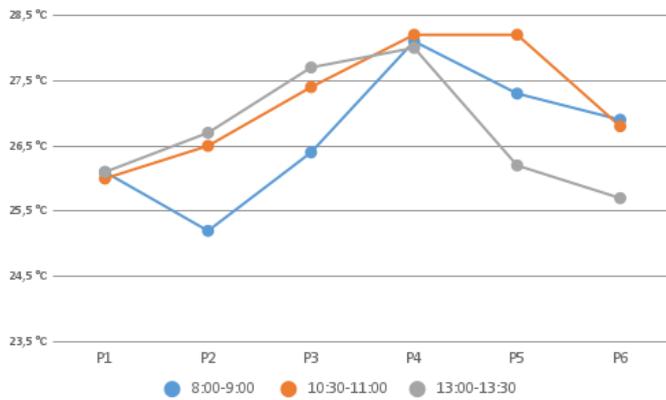


Figura 7. Temperatura del aire. Fuente: Elaboración de los Autores.

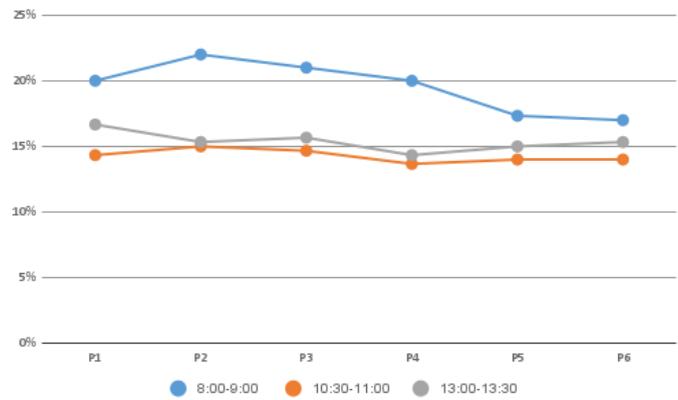


Figura 8. Humedad Relativa. Fuente: Elaboración de los Autores.

El mayor flujo de movimiento se centra en P5 y P6 con mayor participación del género femenino y masculino respectivamente (b) (Figura 6). Sin embargo, se denota que el nivel de actividad predominante es de tipo lento (d) que registra que un 39.9% de estudiantes debido a que prefieren el tipo de recreación pasiva en P4, seguido de un 31.3% con actividad moderada y 26.4% que realizan actividad intensa ya que practican algún deporte como el fútbol en P5 y P6. Además, se destaca que el 80.3 % no interactúa con el área verde, que en este caso sería el huerto (P3), probablemente debido a la falta de equipamiento recreativo que resulta más atractivo para los niños (e).

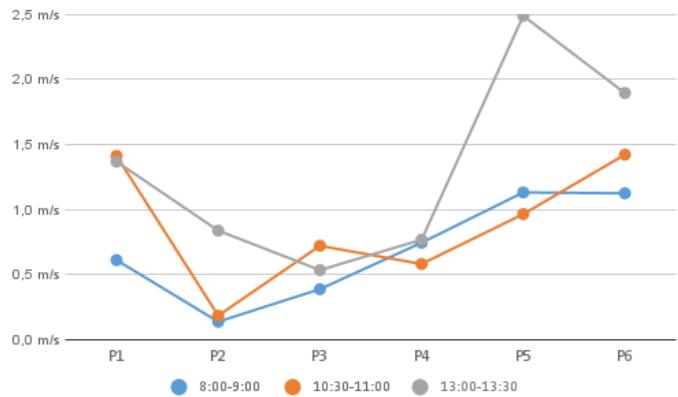


Figura 9. Velocidad del viento. Fuente: Elaboración de los Autores.

## RESULTADOS

A partir de los datos preliminares, se procedió con las mediciones de variabilidad climática, las que fueron ingresadas al Software Rayman para determinar el índice PET (Deng y Wong, 2020). Posteriormente, los resultados fueron comparados con la clasificación de confort térmico de Morakinyo et al. (2018) a partir del mapa de comportamiento de los niños. Luego, se intervinieron todos los espacios con estrategias ecológicas de diseño aplicándose la Guía *La aventura de aprender. Cómo intervenir un patio escolar* (Basurama, 2024). Finalmente, mediante simulación con el software Revit y ENVI-met se compara el estado actual con los espacios intervenidos.

### ANÁLISIS DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA

El análisis se dividió en tres bloques horarios: de 8:00 a. m. a 9:00 a. m., cuando los estudiantes están en aula; de 10:30 a. m. a 11:00 a. m., durante el receso escolar, cuando el patio está ocupado; y de 1:00 p. m. a 1:30 p. m., al momento de salida, cuando los estudiantes se desplazan hacia la puerta. Esta división facilitó una evaluación precisa del comportamiento térmico según la ocupación del patio.

Se considera la máxima temperatura del aire, como indicador del escenario más desfavorable (Figura 7), ya que, a mayor temperatura, el confort térmico disminuye debido al clima cálido del caso de estudio. Por lo tanto, de los 6 puntos escogidos se observa que, P4 registra los niveles más altos de temperatura con un promedio de 28.1°C a diferentes horas del día. A pesar de encontrarse en el nivel intermedio, su temperatura podría incrementarse al no contar con protección solar y tener un suelo de tierra natural.

Al igual que en el indicador anterior, se identifica a P4 como el más afectado, ya que presenta la humedad más baja en el horario crítico de 10:30 horas a 11:00 horas, cuando los estudiantes presentan una máxima estancia en un nivel de actividad moderada, lo que justifica la necesidad de estrategias para mejorar el confort térmico. En este horario, P5 también presenta temperaturas elevadas, pese a ser de concreto, lo que sugiere que la proporción reducida del espacio similar a P4 influye en la acumulación térmica, ya que superficies menores tienden a retener más calor. Además, al encontrarse su superficie

Tabla 1. Síntesis de la variabilidad climática. Fuente: Elaboración de los Autores.

PUNTOS	TA (°C)	HR (%)	V (m/s)	TG (°C)	RG (W/m2)	PET1	PET2
P1	27.0	13	2.37	18.8	715.2	30.0°C	30.6°C
P2	27.8	15	1.33	18.8	715.2	35.0°C	35.0°C
P3	28.6	14	1.53	18.8	715.2	35.2°C	35.3°C
P4	29.8	13	1.89	18.8	715.2	35.8°C	35.8°C
P5	29.5	13	3.75	18.8	715.2	32.2°C	32.3°C
P6	28.3	14	3.00	18.8	715.2	31.7°C	31.7°C



Figura 10. Comparativa basada en la adición de árboles y áreas verdes. Fuente: Elaboración de los Autores

de tierra expuesta al sol impide la generación de microclimas. Asimismo, P5 y P6 presentan niveles bajos de humedad relativa, lo que sugiere que el material de concreto también contribuye a la pérdida de humedad, a pesar de contar con cobertura solar.

Los resultados de la Figura 9 indican que las altas velocidades de viento, en climas cálidos de sierra, pueden reducir excesivamente la sensación térmica, generándose incomodidad, especialmente en niños en reposo o con poca actividad. P5 y P6 están más expuestos al viento debido a la falta de elementos de control, como vegetación o muros, aunque esto ocurre cuando los estudiantes ya se encuentran en sus aulas, minimizando el impacto. Por otro lado, P2 presenta las velocidades más bajas gracias a su entorno rodeado de edificaciones que bloquean los vientos predominantes del sur, a diferencia de P5, donde el viento circula sin obstáculos.

### SENSACIÓN TÉRMICA

Para evaluar la sensación térmica, se utilizó la data climática, al añadir la temperatura del globo (bulbo seco) y radiación global obtenida de Windy.com (2024). y

TuTiempo.net. (2024) sintetizada en la Tabla 1. Junto con las características de los niños y las coordenadas de la escuela, mediante el software RayMan se obtuvo el PET para cada punto. Para poder realizar la simulación en dicho programa se agregan los datos obtenidos de los indicadores, información geográfica de la infraestructura y las características de edad, género, peso, altura y tasa metabólica de dos niños de 6 y 11 años que representan respectivamente el primer y último grado de educación primaria, la que fue extraída del Ministerio de Salud (2015), según lo establecido en la *Guía Técnica para la Valoración Nutricional Antropométrica*.

Los valores de PET obtenidos rondaron los 30 °C para ambos grupos etarios (PET1 y PET2). Según la escala de sensación térmica, P1 y P6 se clasificaron como “tibio”, mientras que P2 a P5 alcanzaron el nivel de “caliente”. Ningún punto se ubicó dentro del rango de confort térmico (18 °C – 23 °C) recomendado para niños de 6 a 11 años. P1 mostró mejores condiciones térmicas gracias a su vegetación y sombra natural, mientras que en P6, pese al pavimento de concreto, la mayor superficie, presencia de sombra y ventilación directa atenuaron la acumulación térmica.



Figura 11. Comparativa en función a la materialidad. Fuente: Elaboración de los Autores.



Figura 12. Implementación de mobiliario ecológico. Fuente: Elaboración de los Autores.

## APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS ARQUITECTÓNICAS ECOLÓGICAS

ENVI-met permitió simular intervenciones orientadas a reducir el estrés térmico mediante mobiliario ecológico, aumento de vegetación y cambio de pavimento. Se incorporaron casuarinas y palo verde por su follaje denso y altura, lo que aseguró sombra continua en zonas de tránsito y estancia, independientemente del ángulo solar (Figura 10). La cobertura vegetal se incrementó en un 70 % con la inclusión de 12 árboles, que generaron un entorno más fresco y confortable.

Se reemplazó el 90% de caminerías de concreto por ladrillo rojo triturado (Figura 11) que no refleja el sol y es un material rígido de alta resistencia y 10% con loseta de caucho para P3, ya que tiene un alto coeficiente de absorción, siendo un material flexible de alta resistencia, atractivo por su variedad de colores y óptimo ante los impactos por caída de los estudiantes, ya que en el análisis de actividades se determinó que esta área la utilizaban para correr.

A partir del análisis de actividades, se diseñó un mobiliario recreativo ecológico de mesas, sillas, juegos con neumáticos, jardineras, cabañas e invernadero (Figura

Tabla 2. Detalle de implementación de estrategias arquitectónicas. Fuente: Elaboración de los Autores.

PUNTOS	Implementación de mobiliario ecológico (unidad)	Incremento de árboles (unidad)	Incremento de área verde %	Cambio de pavimento %	Observaciones
P1	-	2	-	10%	-
P2	-	1	-	10%	-
P3	3	5	40%	30%	Juegos recreativos
P4	4	2	55%	20%	Huerto
P5	-	-	-	30%	Losa deportiva
P6	-	2	10%	30%	Losa deportiva

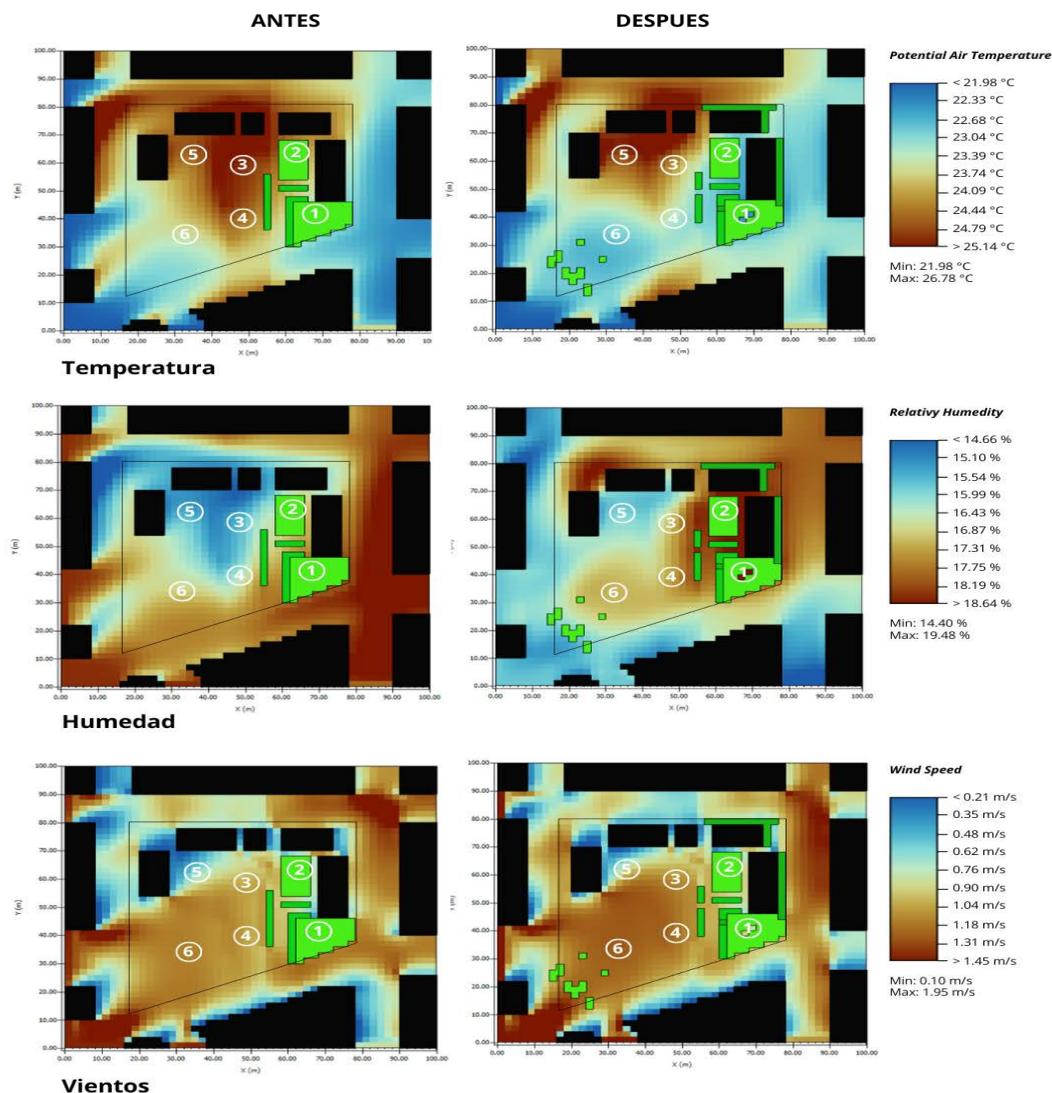


Figura 13. Análisis comparativo de la variabilidad climática. Fuente: Elaboración de los Autores.

12) para integrar las actividades recreativas en espacios poco transitados (P3 y P4), y que cumplan con criterios ergonómicos para el confort de los estudiantes de nivel primaria.

Como materiales se priorizó la madera, neumáticos, sogas, bambú, botellas de plástico y mallas de pesca. Todas

estas especificaciones de materialidad fueron sometidas a Envi-met, lo que permitió comparar el estado actual del patio escolar con la intervención propuesta mediante simulación.

En la Tabla 2, se puede observar que los mayores cambios se presentaron en P3 y P4. Por ejemplo, en P3

Tabla 3. Comparación de los resultados del PET. Fuente: Elaboración de los Autores.

PUNTOS	PET 01 °C Antes	PET 01 °C Después	Diferencia °C	PET 02°C Antes	PET 02°C Después	Diferencia °C	Sensación térmica (Antes)	Sensación térmica (Después)
P1	30.5	29.1	1.4	30.6	29.2	1.4	Tibio	Tibio
P2	35.0	29.3	5.7	35.0	29.3	5.7	Caliente	Tibio
P3	35.3	28.9	6.4	35.3	28.7	6.6	Caliente	Ligeramente tibio
P4	35.8	28.7	7.1	35.8	28.6	7.2	Caliente	Ligeramente tibio
P5	32.2	30.9	1.3	32.3	30.8	1.5	Caliente	Tibio
P6	31.7	30.2	1.5	31.7	30.2	1.5	Tibio	Tibio

se reubicaron los juegos recreativos, se incrementó la cantidad de árboles, área verde y se reemplazó un 30 % del pavimento. Mientras que en P4, se adicionó la zona de huerto, que amplió de esta manera el área verde en un 55%, mejorándose de esta manera el confort térmico.

### COMPARATIVA DEL ESTADO ACTUAL CON LA INTERVENCIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN

Al integrar las estrategias arquitectónicas ecológicas, el calor se redujo en P6 y P4 de 1.4°C a 1.6°C respectivamente, la humedad aumentó en 6% debido al incremento de áreas verdes y la velocidad del viento se mantuvo (Figura 13).

Finalmente, con los nuevos valores de simulación climática, se evaluó PET con Rayman y se comparó con los valores iniciales. El índice PET disminuyó y alcanzó un promedio de reducción de 3.92°C en PET 1 y de 3.98°C en PET 2 (Tabla 3). Fue P4 el de mayor reducción de calor, debido al cambio de pavimento de tierra a área verde, a la adición de 1 árbol y del invernadero ecológico. Por el contrario, P1 redujo sólo 1.4°C debido a que sólo se aumentó 2 árboles, al ser una intervención no significativa. Según la Tabla 3 adaptó el modelo de Marchante González y González Santos (2020) se pasó de "estrés por calor" a "sin estrés térmico". En P5 la reducción promedio fue de 1.4°C, debido a la exposición a las ráfagas de viento; por lo que, los 3 árboles planteados como barrera natural permitieron mejorar marcadamente su sensación térmica. Las reducciones notables se dieron en P2, con 5.7°C de gradiente, así como en P3 y P4.

## DISCUSIÓN

Esta investigación, evidencia la posibilidad de mejorar los patios escolares con estrategias arquitectónicas ecológicas. Si bien, no se alcanzó el estado "confortable" en la escala de sensación térmica, se consiguió un nivel "ligeramente tibio", cercano a la meta, por lo que este

modelo podría ser replicable, con diferentes adaptaciones en función a la materialidad local.

Las estrategias se basaron en el incremento de árboles, área verde, cambio de pavimento y diseño de mobiliario que consiguieron reducir en promedio la sensación térmica en 3.96°C, cabe indicar que las modificaciones no se centraron en la masa constructiva, como ocurre en Salameh (2024) quien modificó las proporciones y forma del patio. Además, se demostró como actúan las barreras naturales frente a las ráfagas de viento con la implementación de casuarinas y palo verde, con reducciones de 1.4°C de P5 y de 7.1°C en P4, confirmando la optimización del espacio mediante la sombra señalada por Namazi et al. (2024) y Abdallah (2022) para mitigar eficazmente el calor. Asimismo, ya que, la orientación de la edificación no permitía generar sombra sobre el patio escolar, fue necesario la implementación de árboles; coincidiendo con Oregi et al. (2024) quienes inciden en la importancia de la orientación del edificio y las edificaciones vecinas. El cambio de pavimento en un 90% permitió generar mejoras las que concuerdan con Namazi et al. (2024) que reemplazó materiales oscuros y artificiales al crear espacios escolares térmicamente confortables. Por otro lado, Guo et al. (2022) midieron sus variables en 14 puntos categorizados únicamente por su materialidad. A diferencia de ello, en esta investigación se consideró 6 puntos de medición clasificados por materialidad, desniveles de piso y características espaciales, lo que permitió clarificar que a pesar que algunos puntos se encontraban a 3 m. del nivel 0, no eran los más ventilados. Las ráfagas de viento se producían sobre los niveles inferiores que no contaban con ningún tipo de protección. Además, un dato inusual registrado fue el aumento en la variación de los vientos en P5, con un pico de 2.50 m/s, a diferencia de los demás puntos que fluctúan entre 0.62 m/s y 0.14 m/s, lo que se debe a que, al recibir directamente las ráfagas de viento, en P5 se forma una especie de ciclón que genera un leve estrés por frío, que afecta la percepción térmica en esa zona del patio.

Como limitaciones del estudio, se recalca que, al tratarse de una población infantil, a diferencia de Jansson et al. (2018), no se incluyó encuestas en la metodología, ya que se complican las autorizaciones para estudiantes. Asimismo, por el tiempo de ejecución del estudio y la disponibilidad de los equipos, la toma de información climatológica se resumió en un día, no debe asumirse como representativa para el año completo. Se dispuso de un tiempo limitado para la observación de las actividades y desplazamiento de los estudiantes, ya que el patio es utilizado principalmente en el periodo de recreo escolar que dura solamente 30 minutos.

## CONCLUSIONES

La integración de estrategias arquitectónicas ecológicas mejoró significativamente las condiciones térmicas en el patio escolar, al reducir 3.96°C a nivel de PET, mediante el incremento del 70% de área verde, 12 árboles ubicados estratégicamente, lo que modifica el 90% de pavimento y con la adición de 7 mobiliarios ecológicos.

P4 fue el punto más afectado en cuanto a temperatura y humedad, por ello registró el PET inicial más elevado. Sin embargo, logró reducir 7.1°C, que superó al resto, esto puede explicarse porque se emplearon todas las estrategias, a diferencia de P1 en la que se implementó solo 2 árboles.

Se evidencia que, a mayor temperatura, menor humedad y vientos, el índice PET se eleva. Sin embargo, las ráfagas de viento no constituyen un indicador potencial, ya que los puntos con valores elevados de viento (P5 y P6), también tuvieron una sensación térmica tibia. La aplicación de estrategias en P1 y P6 no cambió de nivel la sensación térmica, pero si la redujo entre 1.4°C y 1.5°C respectivamente.

Aunque la mayoría de los espacios recreativos están equipados con estructuras de sombra artificial, se registraron picos altos de temperatura (28.2°C en P5). Por ello es necesario buscar otras estrategias a nivel de piso que permitan equilibrar la sensación térmica de los niños durante el desarrollo de sus actividades activas y pasivas.

Finalmente, en futuras investigaciones este estudio podría validar sus intervenciones en diferentes estaciones. Además, la muestra podría ampliarse para analizar diferentes casuísticas que permitan comprender las condiciones térmicas de los patios escolares en diferentes contextos.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CREDIT

Conceptualización, K.G.V.C., P.C.D.M., V.R.I.I.;  
Curación de datos, K.G.V.C., P.C.D.M.; Análisis formal,

K.G.V.C., V.R.I.I.; Adquisición de financiación K.G.V.C.;  
Investigación, K.G.V.C., P.C.D.M., V.R.I.I.; Metodología,  
K.G.V.C., P.C.D.M., V.R.I.I.; Administración de proyecto,  
K.G.V.C.; Recursos, K.G.V.C.; Software, K.G.V.C.;  
Supervisión, P.C.D.M., V.R.I.I.; Validación, K.G.V.C.,  
P.C.D.M., V.R.I.I.; Visualización, K.G.V.C., V.R.I.I.; Escritura  
– borrador original, K.G.V.C., P.C.D.M., V.R.I.I.; Escritura –  
revisión y edición, K.G.V.C., P.C.D.M., V.R.I.I.

## AGRADECIMIENTOS

Artículo desarrollado bajo el Trabajo de Investigación del curso de Taller de Investigación en Arquitectura, 2024

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdallah, A. S. H., (2022). Passive design strategies to improve student thermal comfort in Assiut University: A field study in the Faculty of Physical Education in hot season. *Sustainable Cities and Society*, 86, 104110. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104110>

Akoumianaki-Ioannidou, A., Paraskevopoulou, A. T., y Tachou, V. (2016). School grounds as a resource of green space to increase child-plant contact. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, 375–386. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.10.009>

Bates, C. R., Bohnert, A. M., y Gerstein, D. E. (2018). Green Schoolyards in Low-Income Urban Neighborhoods: Natural Spaces for Positive Youth Development Outcomes. *Frontiers in Psychology*, 9, 805. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00805>

Bernardes, M., y Vergara, L. G. L. (2017). Aprendiendo entre la naturaleza: Una revisión de los beneficios de los espacios verdes en el ambiente escolar. *Arquitecturas del Sur*, 35(52), 96–103. <https://doi.org/10.22320/07196466.2017.35.052.09>

Binabid, J., Alymani, A., y Alammari, A. (2024). Optimizing Outdoor Thermal Comfort for Educational Buildings: Case Study in the City of Riyadh. *Buildings*, 14(11), 3568. <https://doi.org/10.3390/buildings14113568>

CIBSE. (s.f.). Guide A: Environmental Design. Chartered Institution of Building Services Engineers, de <https://iierga.com/wp-content/uploads/sites/2/2017/10/CIBSE-Guide-A-Environmental-design.pdf>

Deng, J. Y., y Wong, N. H. (2020). Impact of urban canyon geometries on outdoor thermal comfort in central business districts. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101966. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101966>

Duarte-Tagles, H., Salinas-Rodríguez, A., Idrovo, Á. J., Búrquez, A., y Corral-Verdugo, V. (2015). Biodiversidad y síntomas depresivos en adultos mexicanos: exploración de los efectos benéficos del ambiente. *Biomédica*, 35(2), 46–57. <https://doi.org/10.7705/BIOMEDICA.V35I0.2433>

Guo, W., Jiang, L., Cheng, B., Yao, Y., Wang, C., Kou, Y., Xu, S., y Xian, D. (2022). A study of subtropical park thermal

comfort and its influential factors during summer. *Journal of Thermal Biology*, 109, 103304. <https://doi.org/10.1016/J.JTHERBIO.2022.103304>

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2022). *Compendio Estadístico: Arequipa 2022*. <https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/4132137-compendio-estadistico-arequipa-2022>

Jansson, M., Abdulah, M., y Eriksson, A. (2018). Secondary school students' perspectives and use of three school grounds of varying size, content and design. *Urban Forestry & Urban Greening*, 30, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.01.015>

Basurama (2024). *La aventura de aprender. Cómo intervenir un patio escolar*. Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado (INTEF). [https://www.libreria.educacion.gob.es/libro/la-aventura-de-aprender-como-intervenir-un-patio-escolar\\_184810](https://www.libreria.educacion.gob.es/libro/la-aventura-de-aprender-como-intervenir-un-patio-escolar_184810)

Lanza, K., Alcazar, M., Hoelscher, D. M., y Kohl, H. W. (2021). Effects of trees, gardens, and nature trails on heat index and child health: design and methods of the Green Schoolyards Project. *BMC Public Health*, 21, 98. <https://doi.org/10.1186/s12889-020-10128-2>

Lavilla Cerdán, L. (2013). La observación sistemática. *Revista de Claseshistoria*, (6), 374. <http://www.claseshistoria.com/revista/2013/articulos/lavilla-observacion-sistemática.pdf>

Lindemann-Matthies, P., y Köhler, K. (2019). Naturalized versus traditional school grounds: Which elements do students prefer and why? *Urban Forestry & Urban Greening*, 46, 126475. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126475>

Mahmoud, R. M. A., y Abdallah, A. S. H. (2022). Assessment of outdoor shading strategies to improve outdoor thermal comfort in school courtyards in hot and arid climates. *Sustainable Cities and Society*, 86, 104147. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104147>

Marchante González, G., y González Santos, A. I. (2020). Evaluación del confort y desconfort térmico. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 41(3), 21-40. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59282020000300021#B19](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282020000300021#B19)

Meteo Consult. (25 de septiembre 2024). *Previsiones meteorológicas y clima*. <https://www.meteoconsult.fr/>

Ministerio de Salud. (2015). *Guía técnica para la valoración nutricional antropométrica de la persona adolescente*. Instituto Nacional de Salud. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/390257/guia-tecnica-para-la-valoracion-nutricional-antropometrica-de-la-persona-adolescente.pdf?v=1571242432>

Morakinyo, T. E., Lau, K. K.-L., Ren, C., y Ng, E. (2018). Performance of Hong Kong's common trees species for outdoor temperature regulation, thermal comfort and energy saving. *Building and Environment*, 137, 157–170. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.04.012>

Namazi, Y., Charlesworth, S., Montazami, A. y Taleghani, M. (2024). The impact of local microclimates and Urban Greening Factor on schools' thermal conditions during summer: A study in Coventry, UK. *Building and Environment*. 262, 111793. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111793>

Oregi, X., Goti, A., Pérez-Acebo, H., Alvarez, I., Eguia, M.I. y Alberdi, E. (2024). Development of a Transdisciplinary Research-Based Framework for the Improvement of Thermal Comfort of Schools Through the Analysis of Shading System. *Buildings*, 15(1), 47. <https://doi.org/10.3390/buildings15010047>

Pasek, M., Szark-Eckardt, M., Wilk, B., Zuzda, J., Żukowska, H., Opanowska, M., Kuska, M., Drózd, R., Kuśmierczyk, M., Sakłak, W., & Kupcewicz, E. (2020). Physical Fitness as Part of the Health and Well-Being of Students Participating in Physical Education Lessons Indoors and Outdoors. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(1), 309. <https://doi.org/10.3390/ijerph17010309>

Royé, D., Martí Ezpeleta, A., y Cabalar Fuentes, M. (2012). *Aproximación al comportamiento espacial del estrés térmico en Galicia mediante el uso del índice bioclimático PET*. [https://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0092\\_PU-SA-VIII-2012-D\\_ROYE.pdf](https://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0092_PU-SA-VIII-2012-D_ROYE.pdf)

Salameh, M. (2024). Modifying School Courtyard Design to Optimize Thermal Conditions and Energy Consumption in a Hot Arid Climate. *Journal of Architectural Engineering*, 30(4). <https://doi.org/10.1061/jaeied.aeeng-1813>

The Weather Channel. (25 de septiembre de 2024.). *Weather forecast and climate information*. <https://weather.com/>

Tiempo3. (25 de septiembre de 2024). *El clima en Arequipa, Perú*. <https://www.tiempo3.com/south-america/peru/tacna/arequipa>

TuTiempo.net. (25 de septiembre de 2024). *El Tiempo: Pronóstico del tiempo para tu ciudad*. <https://www.tutiempo.net>

Windy.com. (25 de septiembre de 2024). *Wind map & weather forecast*. <https://www.windy.com/>



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

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

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

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

### **Andrea Nataly Moreno-Albuja**

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

### **Vanessa Guillén-Mena**

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

### **Nathalie Madeleine Santamaría-Herrera**

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



## RESUMEN

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

### Palabras clave

aislación térmica, arquitectura bioclimática, eficiencia energética, sistemas constructivos

## ABSTRACT

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

### Keywords

thermal insulation, bioclimatic architecture, energy efficiency, construction systems

## RESUMO

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

### Palavras-chave:

isolamento térmico, arquitetura bioclimática, eficiência energética, sistemas construtivos

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años las emisiones provenientes de la industria de la construcción y las relacionadas con la operación de edificios han sido responsables del 38% de las emisiones globales de CO<sup>2</sup> (Guillén Mena et al., 2015). Parte de esta situación se debe a que existe un creciente interés de las personas en mejorar su calidad de vida mediante un ajuste del ambiente térmico de las edificaciones (Chang et al., 2021).

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

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

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

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

## CONDICIONES DEL LUGAR DE ESTUDIO

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

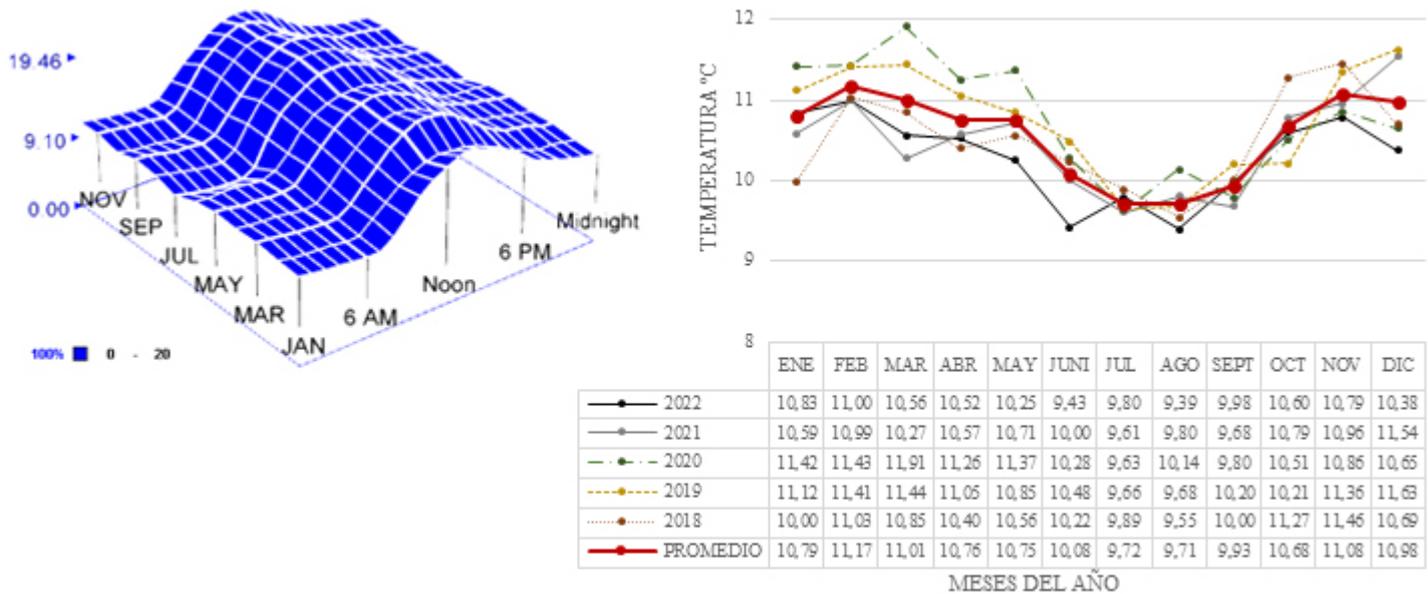


Figura 1. Temperatura mensual promedio del período 2018-2022. Fuente: INAHMI (2023).

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

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

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

## METODOLOGÍA

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

### FASE I: SELECCIÓN DE CASOS DE ESTUDIO

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

## FASE II: MONITORIZACIÓN DE VIVIENDAS

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

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

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

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

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

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

## FASE III: DETERMINACIÓN DEL RANGO DE CONFORT TÉRMICO

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

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

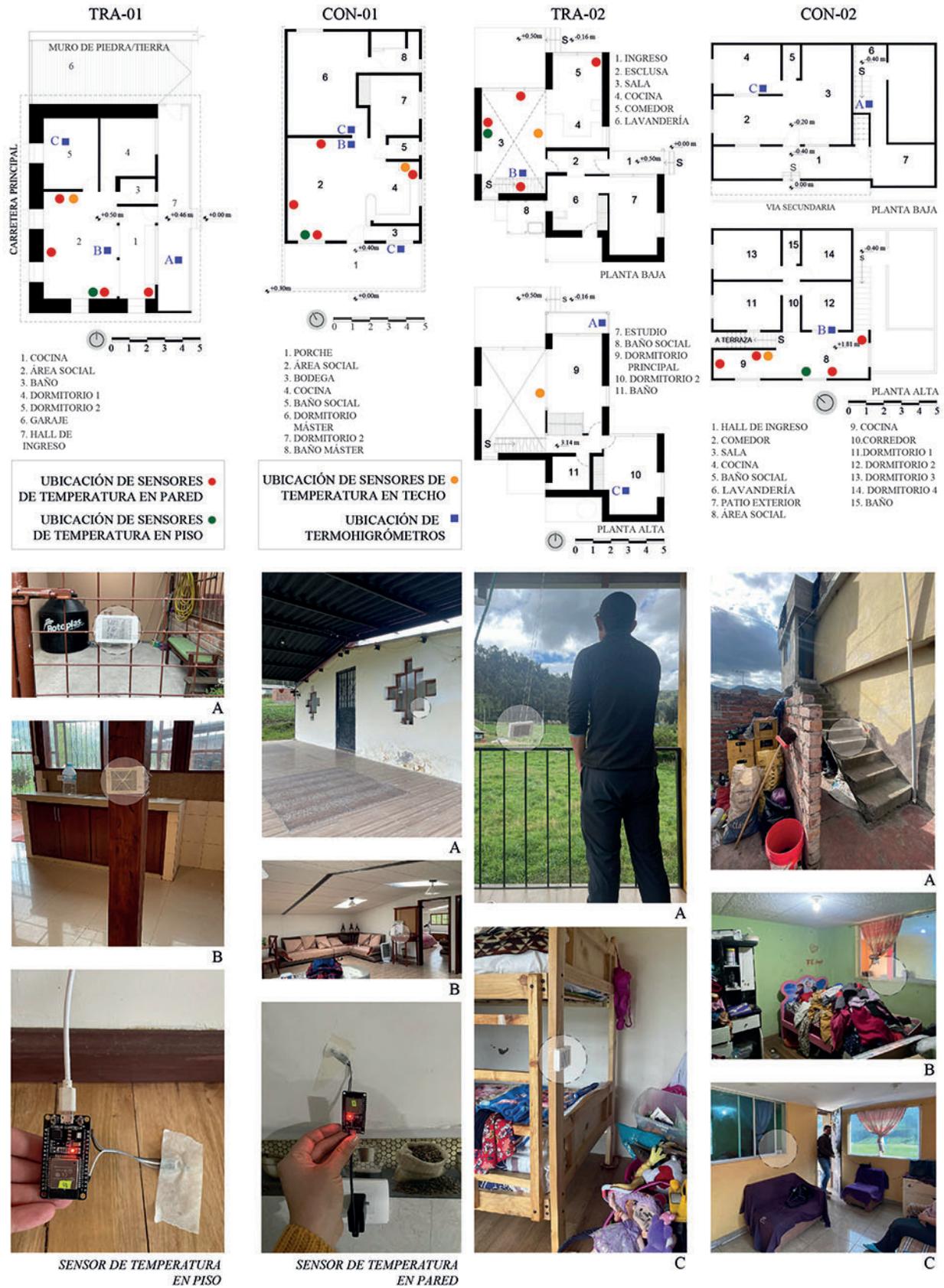


Figura 3. Plantas y ubicación de equipos en casos de estudio. Fuente: Elaboración de los Autores.

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

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

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

$$T_{rm} = \frac{(0,08(T_s \text{ techo} + T_s \text{ suelo}) + 0,23(T_s \text{ derecha} + T_s \text{ izquierda}) + 0,35(T_s \text{ dante} + T_s \text{ detrás}))}{2(0,08 + 0,23 + 0,35)}$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### MONITOREO DE TEMPERATURA INTERIOR Y EXTERIOR

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

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

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

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

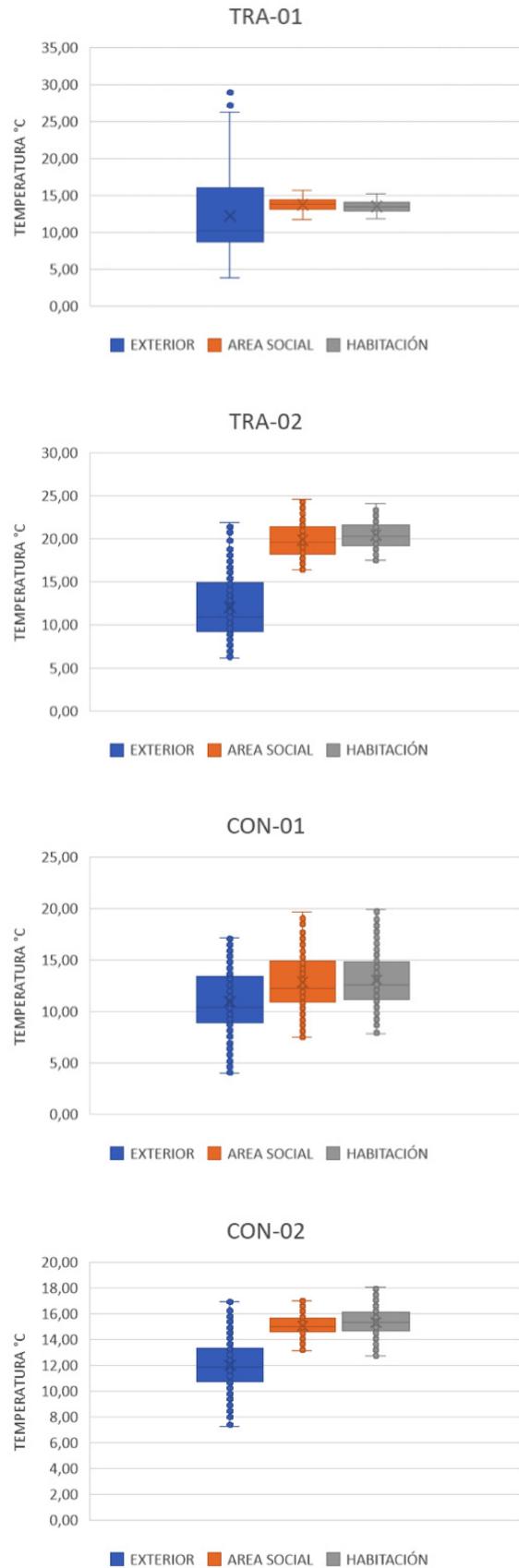


Figura 4. Temperaturas mínimas, máximas y promedio de cada caso de estudio. Fuente: Elaboración de los Autores.

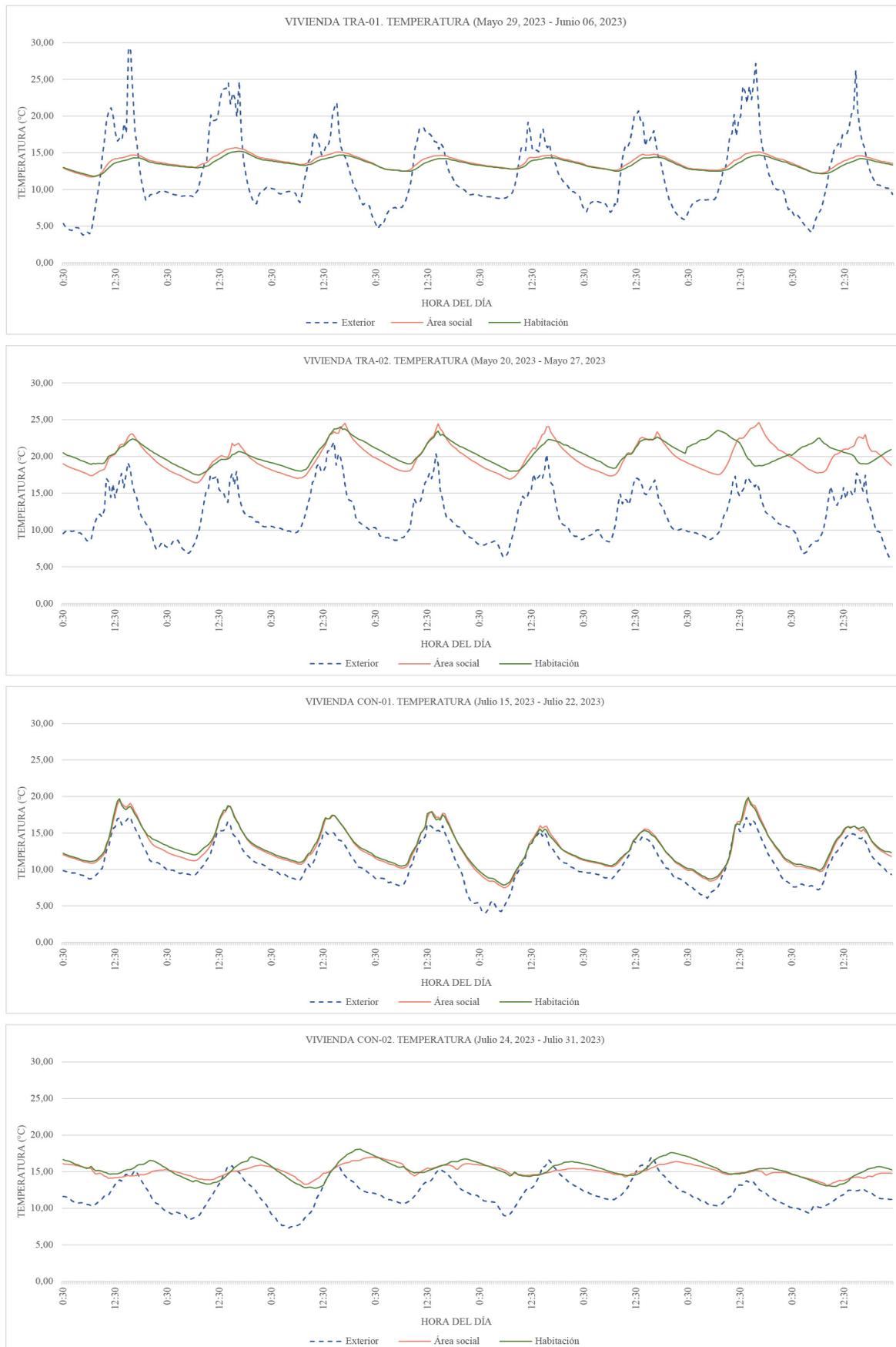


Figura 5. Monitoreo de temperatura interna y externa. Fuente: Elaboración de los Autores.

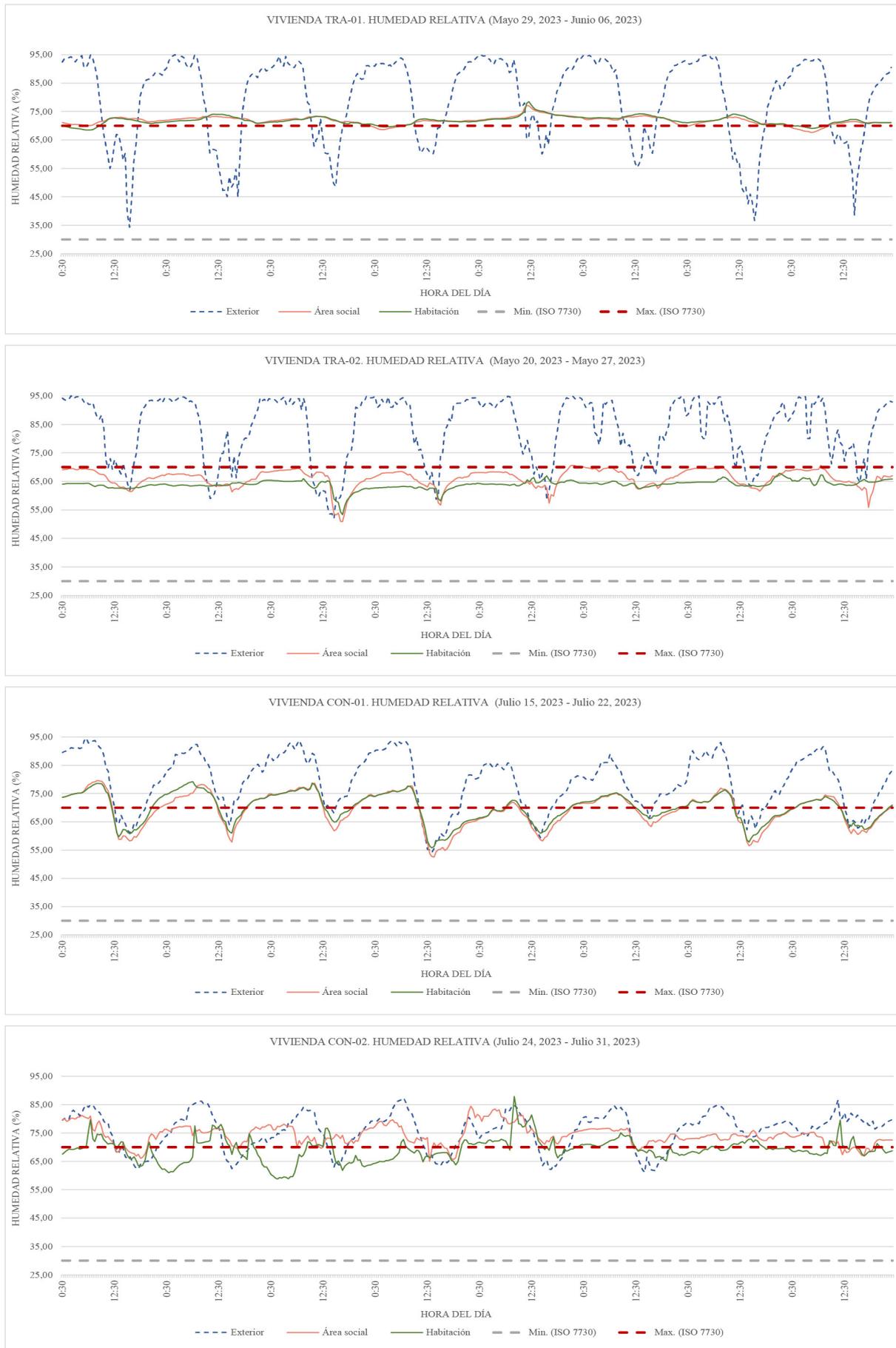


Figura 6. Monitoreo de humedad relativa interior y exterior. Fuente: Elaboración de los Autores.

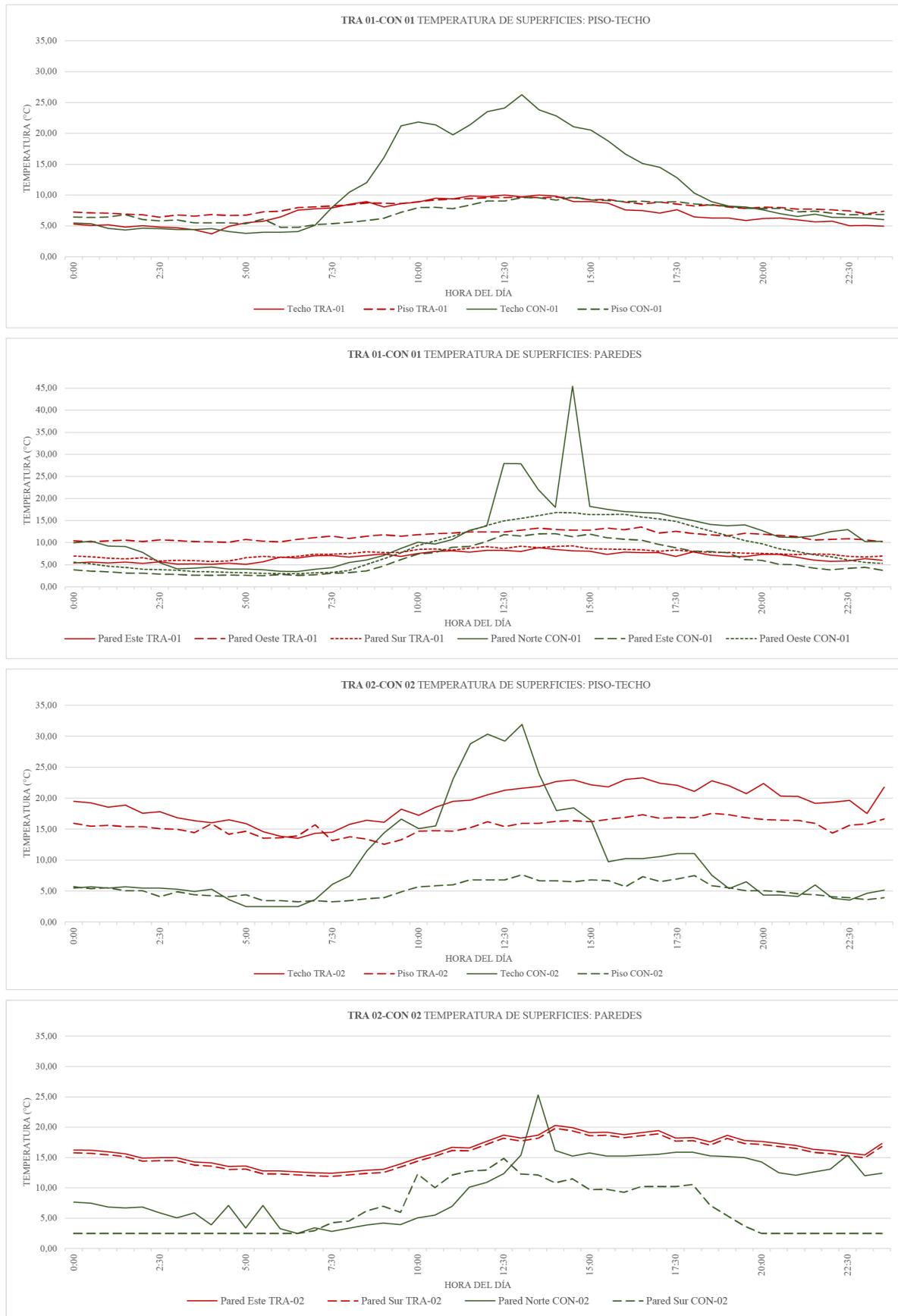


Figura 7. Temperatura de superficies. Fuente: Elaboración de los Autores.

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

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

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

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

### MONITOREO DE HUMEDAD RELATIVA EN INTERIOR Y EXTERIOR

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

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

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

### MONITOREO DE LA TEMPERATURA DE SUPERFICIES

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

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

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

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

### EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO

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

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

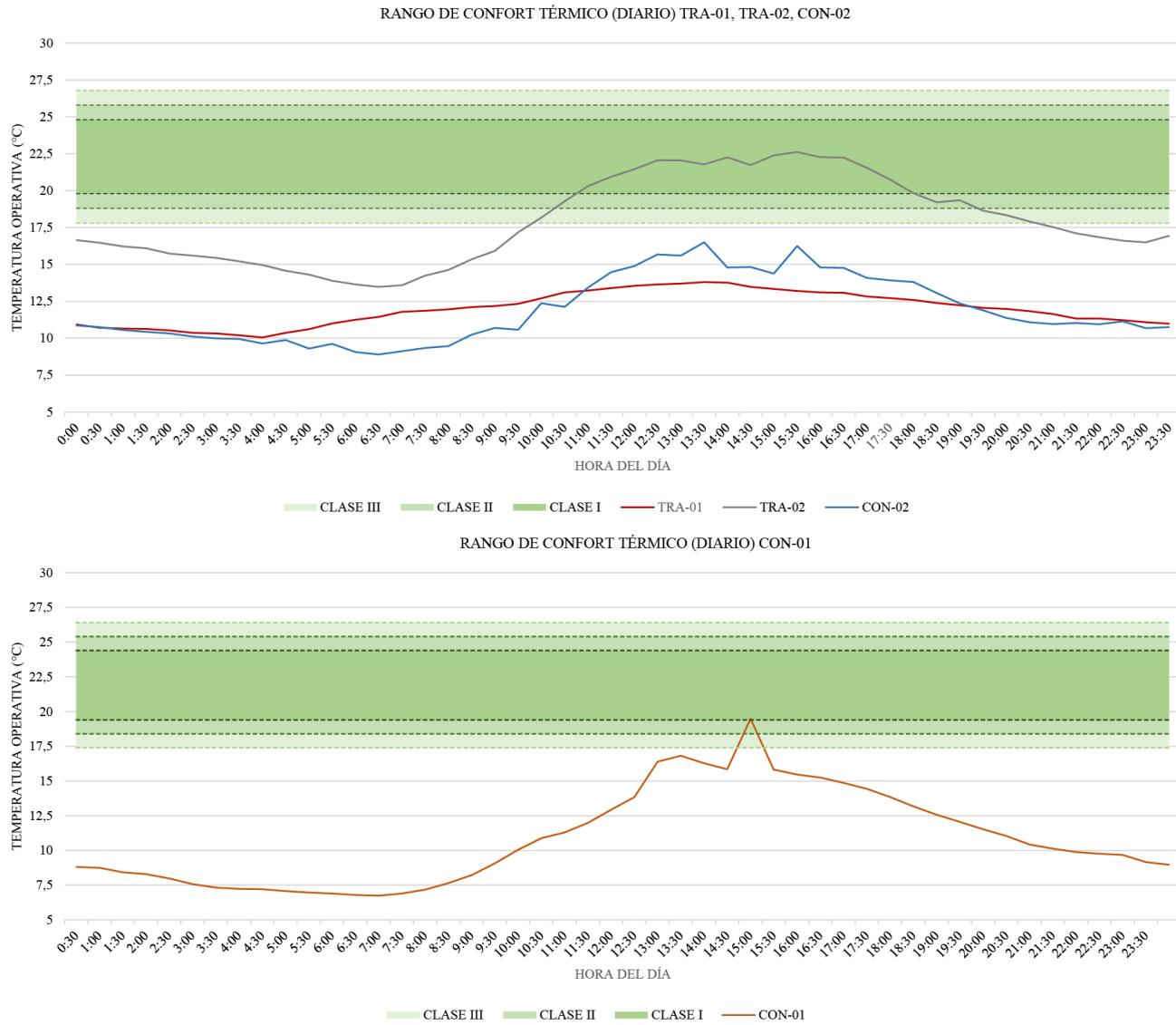


Figura 8. Confort térmico casos de estudio. Fuente: Elaboración de los Autores.

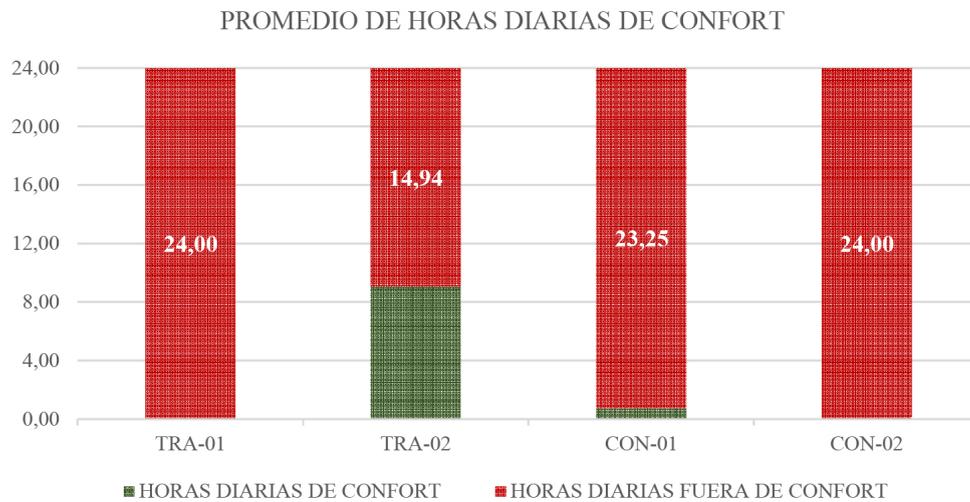


Figura 9. Promedio de Horas de Confort Térmico diarias. Fuente: Elaboración de los Autores.

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

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

### IDENTIFICACIÓN DE ESTRATEGIAS PASIVAS

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

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

El aislamiento es indispensable en todos los componentes de la envolvente: piso, paredes, cubierta. Componentes con valores U sobre 3 W/m<sup>2</sup>K, resultan poco eficientes para mantener un confort térmico en el interior. Para zona climática fría 5, los requisitos de envolvente según la NEC-HS-EE (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2018) es de U-2.8 en techos y U-2.35 en paredes de viviendas no climatizadas. Se sugiere replicar soluciones de paredes y techo de TRA-01 y TRA-02, así como cubierta de CON-02 cuyo aligeramiento de bloque de pómez, se convierte en un aislante térmico.

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

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

### LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y FUTURAS INVESTIGACIONES

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

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

### CONCLUSIONES

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRedit

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

## AGRADECIMIENTOS

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

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE Standard 55 (2020). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
- Atecyr (2010). *Fundamentos de climatización*. Atecyr, Ed.
- Cerrón Contreras, A. (2022). Sistemas de calefacción pasiva para lograr el confort térmico en viviendas alto andinas de Perú. *Cátedra Villarreal*, 10(1), 37–48. <https://doi.org/10.24039/cv20221011379>
- Chang, S., He, W., Yan, H., Yang, L., y Song, C. (2021). Influences of vernacular building spaces on human thermal comfort in China's arid climate areas. *Energy and Buildings*, 244, 110978. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110978>
- Cojocarú, A., y Isopescu, D. (2021). Passive Strategies of Vernacular Architecture for Energy Efficiency. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Construction. Architecture Section*, 67(2), 33 - 44. <https://doi.org/10.2478/bipca-2021-0013>
- Dhaka, S., Mathur, J., Brager, G., y Honnekeri, A. (2015). Assessment of thermal environmental conditions and quantification of thermal adaptation in naturally ventilated buildings in composite climate of India. *Building and Environment*, 86, 17–28. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2014.11.024>
- Gallardo, A., Palme, M., Lobato-Cordero, A., Beltrán, R. D., y Gaona, G. (2016). Evaluating thermal comfort in a naturally conditioned office in a temperate climate zone. *Buildings*, 6(3), 27. <https://doi.org/10.3390/buildings6030027>
- Guillén Mena, V., Quesada Molina, F., López Catalán, M., Orellana Valdés, D., y Serrano, A. (2015). Eficiencia energética en edificaciones residenciales Energetic efficiency in residential Buildings. *Estoa. Journal of the Faculty of Architecture and Urbanism*, 4(7), 59-67. <https://doi.org/10.18537/est.v004.n007.07>
- Harman, L. (2010). *Confort térmico en viviendas altoandinas un enfoque integral*. Balcari Editores.
- INAHMI. (2023). Datos de estación meteorológica San Juan. <https://servicios.inahmi.gob.ec/>
- INEN-ISO 7730. (2014). Norma Técnica Ecuatoriana [NTE] - Servicio Ecuatoriano de Normalización [INEN], Sobre ISO 7730: Ergonomía del entorno térmico.
- Indraganti, M. (2010). Behavioural adaptation and the use of environmental controls in summer for thermal comfort in apartments in India. *Energy and Buildings*, 42(7), 1019–1025. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2010.01.014>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC]. (02, abril de 2024). Censo Ecuador Resultados. <https://www.censoecuator.gob.ec/resultados-censo/#historicos>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (2018). *NEC Norma Ecuatoriana de la Construcción. Eficiencia-Energética en Edificaciones Residenciales (EE) (código NEC-HS-EE)*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/4.-NEC-HS-Eficiencia-Energetica.pdf>
- Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana (2022). Documento Básico HE- Ahorro de energía. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>
- Mino-Rodríguez, I. (2021). *A thermal comfort model for high-altitude regions in the Ecuadorian Andes* [Tesis de Doctorado, University College London]. UCL Discovery. <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10139857>
- Moscoso-García, P., y Quesada-Molina, F. (2023). Analysis of Passive Strategies in Traditional Vernacular Architecture. *Buildings*, 13(8), 1984. <https://doi.org/10.3390/buildings13081984>
- Quesada Molina, F., y Bustillos Yaguana, D. (2018). Indoor environmental quality of urban residential buildings in Cuenca-Ecuador: Comfort standard. *Buildings*, 8(7), 90. <https://doi.org/10.3390/buildings8070090>
- Suasaca Pelinco, L., Apaza Mamani, A., Flores Alfaro, J. A., Perca Chura, O. A., y Quinto Machaca, W. (2020). Influencia de las pacas de avena en la temperatura y humedad en las viviendas en zonas altoandinas. *Revista Investigación & desarrollo*, 20(1), 215–227. <https://doi.org/10.23881/idupbo.020.1-15i>
- Tapia, W. E. (2017). *El confort térmico en las edificaciones de arquitectura vernácula de la ciudad de Loja y Malacatos* [Tesis de Magíster, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional de la Universidad de Cuenca. [https://dspace-test.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/97/simple-search?query=&sort\\_by=score&order=desc&rp=10&filter\\_field\\_1=subject&filter\\_type\\_1>equals&filter\\_value\\_1=Arquitectura+tradicional&filter\\_field\\_2=subject&filter\\_type\\_2>equals&filter\\_value\\_2=Dise%C3%B1o+arquitect%C3%B3nico&etal=0&filtername=author&filterquery=Tapia+Chocho%2C+Wilson+Eduardo&filtertype>equals](https://dspace-test.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/97/simple-search?query=&sort_by=score&order=desc&rp=10&filter_field_1=subject&filter_type_1>equals&filter_value_1=Arquitectura+tradicional&filter_field_2=subject&filter_type_2>equals&filter_value_2=Dise%C3%B1o+arquitect%C3%B3nico&etal=0&filtername=author&filterquery=Tapia+Chocho%2C+Wilson+Eduardo&filtertype>equals)
- Tartarini, F., Schiavon, S., Cheung, T., y Hoyt, T. (2020). CBE Thermal Comfort Tool: Online tool for thermal comfort calculations and visualizations. *SoftwareX*, 12, 100563. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100563>
- UNE-EN 16798-1 (2020). Asociación Normalización Española [UNE]. Eficiencia energética de los edificios. Ventilación de los edificios. Parte 1: Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido. Módulo 1-6. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0063261>

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

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

# REVITALIZACIÓN DEL BAHAREQUE ANCESTRAL DEL PUEBLO KICHWA SARAGURO, ECUADOR: CONSERVACIÓN, ADAPTACIÓN Y DIFUSIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUCTIVO

Recibido 03/04/2025  
Aceptado 26/05/2025

## REVITALIZATION OF THE KICHWA SARAGURO ANCESTRAL WATTLE AND DAUB, ECUADOR: CONSERVATION, ADAPTATION, AND DISSEMINATION OF CONSTRUCTIVE HERITAGE

## REVITALIZAÇÃO DO BAHAREQUE ANCESTRAL KICHWA SARAGURO, ECUADOR : CONSERVAÇÃO, ADAPTAÇÃO E DIFUSÃO DO PATRIMÔNIO CONSTRUTIVO

### **Flor Lozano-Guamán**

Magíster en Arquitectura Egresado de magíster, Facultad de Arquitectura  
Universidad Regional Amazónica Ikiam, Loja, Ecuador  
<https://orcid.org/0009-0001-4417-2512>  
flor.lozano@ucuenca.edu.ec

### **Andrea Jaramillo-Benavides**

Doctora en Arquitectura y Urbanismo "Docente investigadora, Escuela de hábitat, infraestructura y creatividad (EHIC), carrera de Arquitectura"  
Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ibarra,, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0002-2181-8042>  
asjaramillo@pucesi.edu.ec

### **Kuty Lozano-Guamán**

Magíster en Arquitectónicos  
Arquitecto, Antropólogo SD Arquitectura, Saraguro, Ecuador  
<https://orcid.org/0009-0001-8931-9645>  
kurylogu@gmail.com



## RESUMEN

La construcción con bahareque ha evolucionado con el tiempo, pero hoy enfrenta el riesgo de desaparecer debido a la escasez de materiales, la falta de mano de obra y la preferencia por sistemas “más duraderos y versátiles”. Este estudio explora la revitalización del bahareque, técnica constructiva ancestral del pueblo kichwa Saraguro - Ecuador, mediante un enfoque metodológico mixto con varias etapas: análisis de materialidad, diseño, análisis estructural y construcción de un panel de bahareque que integra iconografía andina y se adapta a pórticos contemporáneos de hormigón, metal y madera; desarrollo de un taller práctico para divulgar y evaluar la viabilidad de construcción mediante mingas. Los resultados destacan la viabilidad del bahareque en construcciones actuales, con costo accesible y eficiencia estructural. Se promovió su uso al fomentar la participación comunitaria y la transmisión de conocimientos ancestrales. Es una alternativa para la construcción contemporánea, que preserva la identidad cultural y se adapta a desafíos ambientales.

### Palabras clave

arquitectura tradicional, técnica mixta, paneles modulares, participación comunitaria

## ABSTRACT

Construction with wattle and daub has evolved over time, but today faces the risk of disappearing due to material scarcity, a lack of labor, and a preference for “more durable and versatile” systems. This study explores the revitalization of wattle and daub, an ancestral construction technique of the Kichwa people of Saraguro, Ecuador, through a multi-stage mixed-methodological approach: material analysis, design, structural analysis, and the construction of a wattle and daub panel that integrates Andean iconography and adapts to contemporary concrete, metal, and wood porticos; and a practical workshop to disseminate and evaluate the feasibility of construction through mingas (communal participation). The results highlight the viability of wattle and daub in contemporary construction, with its affordable cost and structural efficiency. Its use was promoted by encouraging community participation and the transmission of ancestral knowledge. It is an alternative for contemporary construction, preserving cultural identity and adapting to environmental challenges.

### Keywords

traditional architecture, mixed construction, modular panels, community participation

## RESUMO

A construção Bahareque evoluiu ao longo do tempo, mas hoje corre o risco de desaparecer devido à escassez de materiais, à escassez de mão de obra e à preferência por sistemas “mais duráveis e versáteis”. Este estudo explora a revitalização do bahareque, uma técnica de construção ancestral do povo Kichwa de Saraguro - Equador, por meio de uma abordagem metodológica mista com várias etapas: análise de materialidade, projeto, análise estrutural e construção de um painel bahareque que integra a iconografia andina e se adapta aos pórticos contemporâneos de concreto, metal e madeira; Desenvolvimento de workshop prático para disseminar e avaliar a viabilidade da construção por meio de mutirões. Os resultados destacam a viabilidade do bahareque na construção moderna, com custo acessível e eficiência estrutural. Seu uso foi promovido pelo incentivo à participação comunitária e à transmissão de conhecimentos ancestrais. É uma alternativa para a construção contemporânea, preservando a identidade cultural e adaptando-se aos desafios ambientais.

### Palavras-chave:

arquitectura tradicional, técnica mista, painéis modulares, participação comunitária

## INTRODUCCIÓN

Aproximadamente entre 650 y 700 millones de personas en el mundo aún viven en casas construidas con materiales de tierra, como adobe, barro y piedra. Esto representa alrededor de una de cada 10 o 12 personas en el planeta. (Marsh y Kulshreshtha, 2021). En Ecuador, según el censo de población y vivienda (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2022), el uso de materiales tradicionales en las construcciones disminuyó de 28,7% a un 13,3% entre censos de cada 10 años; se observan estos porcentajes de vivienda con materiales naturales: bahareque 5,2%, adobe y tapia 2,5%, madera 0,6%. La introducción de nuevos materiales industrializados ha marginado las técnicas constructivas como el bahareque, reemplazándolas por alternativas modernas que alteran el paisaje cultural y la sostenibilidad ambiental (Pesántez Pesántez y Tapia Vera, 2018).

La pérdida acelerada de saberes constructivos ancestrales, la escasa transmisión intergeneracional y el declive en la práctica de estas técnicas en comunidades de pueblos y nacionalidades originarias han dificultado el acceso a soluciones habitacionales que fortalezcan su identidad cultural y promuevan la sostenibilidad. Este fenómeno, presente en Ecuador y diversas regiones de América Latina, representa un riesgo para el patrimonio cultural tangible e intangible, y un desafío para la resiliencia social y ambiental (Cordero et al., 2003).

En el contexto latinoamericano, investigaciones presentadas en el Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con tierra (SIACOT) y los informes de la Red PROTERRA han documentado ampliamente la pérdida de las técnicas ancestrales de construcción con tierra y su impacto sociocultural (Cevallos Salas, 2003). En México, proyectos recientes en Oaxaca han promovido la recuperación y adaptación del bahareque, que fortalece el tejido social y mejora la eficiencia energética de las viviendas (López-Martínez y Torres Garibay, 2023). En Colombia, estudios en el departamento del Cauca integran técnicas tradicionales con soluciones constructivas modernas, que aumentan la durabilidad y el confort térmico de las viviendas rurales de bahareque (Cristancho Barrios, 2024). En Perú, Corrales Blanco et al. (2021) destacan la integración de saberes ancestrales con nuevas tecnologías para crear soluciones resilientes frente a fenómenos climáticos extremos. En Bolivia, el SIACOT ha impulsado la valorización de técnicas tradicionales de adobe y bahareque en proyectos que reducen el impacto ambiental y conservan el patrimonio cultural (Cordero et al., 2003; Neves et al., 2017).

En Ecuador, estudios como el de Pesántez Pesántez y Tapia Vera (2018) resaltan el valor del bahareque como expresión cultural, patrimonio tangible y alternativa sostenible. Asimismo, se han desarrollado experiencias

de mejora de la técnica del bahareque, como los paneles modulares propuestos por Vacacela Albuja y Astudillo Cordero (2015), evidenciando un interés creciente en adaptar la técnica ancestral a modelos constructivos contemporáneos. Esta situación refleja una tendencia generalizada en Iberoamérica, donde el abandono de técnicas ancestrales ha marginado saberes colectivos esenciales para el hábitat (Cordero et al., 2003).

La arquitectura de los pueblos originarios refleja una expresión y relación entre el conocimiento ancestral y el entorno natural. En el caso del pueblo Kichwa Saraguro de la provincia de Loja, al sur de Ecuador, su sistema constructivo tradicional, el bahareque, ha evolucionado en respuesta a las variaciones ambientales y culturales de la región. Es una técnica que promueve la participación comunitaria y está basada en principios de reciprocidad fundamentales para la vida colectiva (Corrales Blanco et al., 2021).

Estas prácticas han sido transmitidas por generaciones, a través del trabajo colectivo o mingas; sin embargo, la globalización ha limitado la continuidad de la transmisión de estos saberes, lo que ha provocado un declive en su práctica. Revitalizar estos procesos es fundamental para abordar los problemas habitacionales en comunidades de pueblos y nacionalidades originarias, donde las soluciones suelen provenir de materiales naturales que, si se utilizan de manera sostenible, ofrecen alternativas viables. La recuperación de estas técnicas se enmarca en los lineamientos de la UNESCO (2024) sobre salvaguardar el patrimonio inmaterial y a los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS11, que promueve ciudades sostenibles y resilientes.

El bahareque local, apreciado por su resistencia sísmica y eficiencia térmica, está en riesgo de desaparecer, esto amenaza el saber ancestral y la identidad cultural (Lozano Guamán, 2021), su rescate y adaptación es fundamental para preservar el patrimonio. Difundir buenas prácticas constructivas con bahareque es esencial para revitalizar esta técnica y reconocer su valor (Corrales Blanco et al., 2021).

## ARQUITECTURA VERNÁCULA

La arquitectura vernácula es un testimonio cultural que surge de la adaptación de las comunidades a su entorno natural, emplea materiales locales y técnicas transmitidas por generaciones (ICOMOS, 1999; Guerrero Baca, 2017). Representa una forma de ser anónima y colectiva, refleja la historia y las costumbres de la comunidad (Calderón, 1985; UNESCO, 2003). Históricamente vinculada al contexto geográfico, social y económico, se ha adaptado para responder a las necesidades habitacionales con los recursos disponibles. Es funcional, sostenible y un medio para preservar la identidad cultural de los pueblos a lo largo del tiempo.

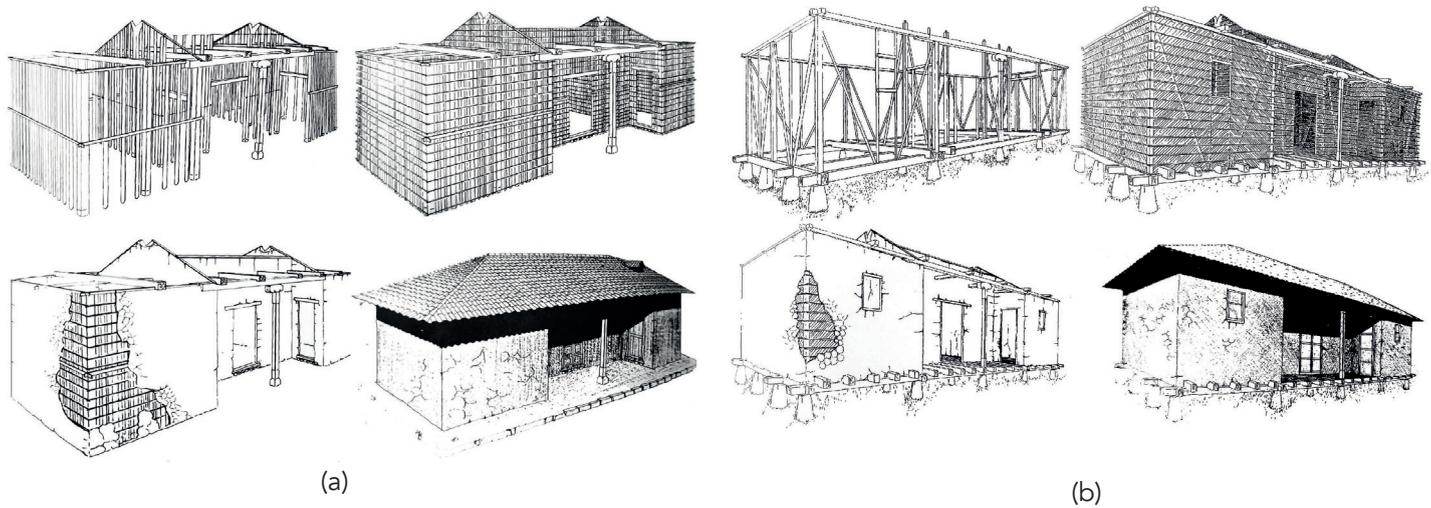


Figura 1. (a) Bahareque parado; (b) bahareque galluchaki. Fuente: Imágenes extraídas de Calderón (1985).

## EL BAHAREQUE EN EL PUEBLO KICHWA SARAGURO

El bahareque, en su forma local utilizada por el pueblo kichwa de Saraguro en el sur de la sierra ecuatoriana. Emplea materiales locales como madera, barro y chincha (suro o *Chusquea scandens Kunth*). Existen dos variantes en Saraguro: el bahareque parado y el bahareque *galluchaki* (o pata de gallo) (Figura 1).

El bahareque parado tiene un entramado de madera vertical anclado en el suelo con bases de piedra para evitar la humedad, lo que otorga mayor resistencia (Calderón, 1985). Aprovecha la orientación del sol y los vientos para mejorar el confort interior (Pacheco, 2007). La deforestación y las regulaciones ambientales han llevado al reemplazo de la "madera de cerro" (término autóctono) por eucalipto. El bahareque *galluchaki* se eleva sobre piedras para evitar la humedad. Las soleras y vigas se ensamblan entre los pilares de madera labrada, que mejora la estabilidad estructural (Calderón, 1985). La mezcla de barro, que recubre el chagleado (entramado) de chincha, incorpora paja de páramo (*Calamagrostis effusa*) y hojas secas, lo que otorga un acabado resistente y versátil.

Además de su valor arquitectónico, estos sistemas fomentan la cooperación comunitaria en mingas de construcción y rituales como la *huarcuna*, que consiste en columpiarse desde una pieza estructural de la vivienda tras el embarre y enteje para validar su resistencia. El bahareque es fundamental para la preservación de la identidad cultural de las comunidades andinas, su revitalización es esencial para afrontar los desafíos habitacionales y climáticos actuales (Lozano Guamán, 2016).

Esta investigación tiene como propósito revitalizar el sistema constructivo de bahareque utilizado por el pueblo kichwa Saraguro, mediante su caracterización

y actualización desde un enfoque integral que articule dimensiones técnicas y culturales. Se busca rescatar este saber ancestral no solo como una técnica constructiva vigente, sino también como una manifestación del patrimonio material e inmaterial que fortalece la identidad comunitaria y promueve prácticas sostenibles en el territorio. Para alcanzar este propósito, se plantean los siguientes objetivos específicos: caracterizar los materiales y técnicas tradicionales del bahareque; evaluar experimentalmente la resistencia y adherencia de la tierra combinada con fibras vegetales locales; diseñar y analizar estructuralmente un panel modular adaptable a sistemas de pórticos contemporáneos; y validar su viabilidad técnica y sociocultural a través de un taller práctico participativo.

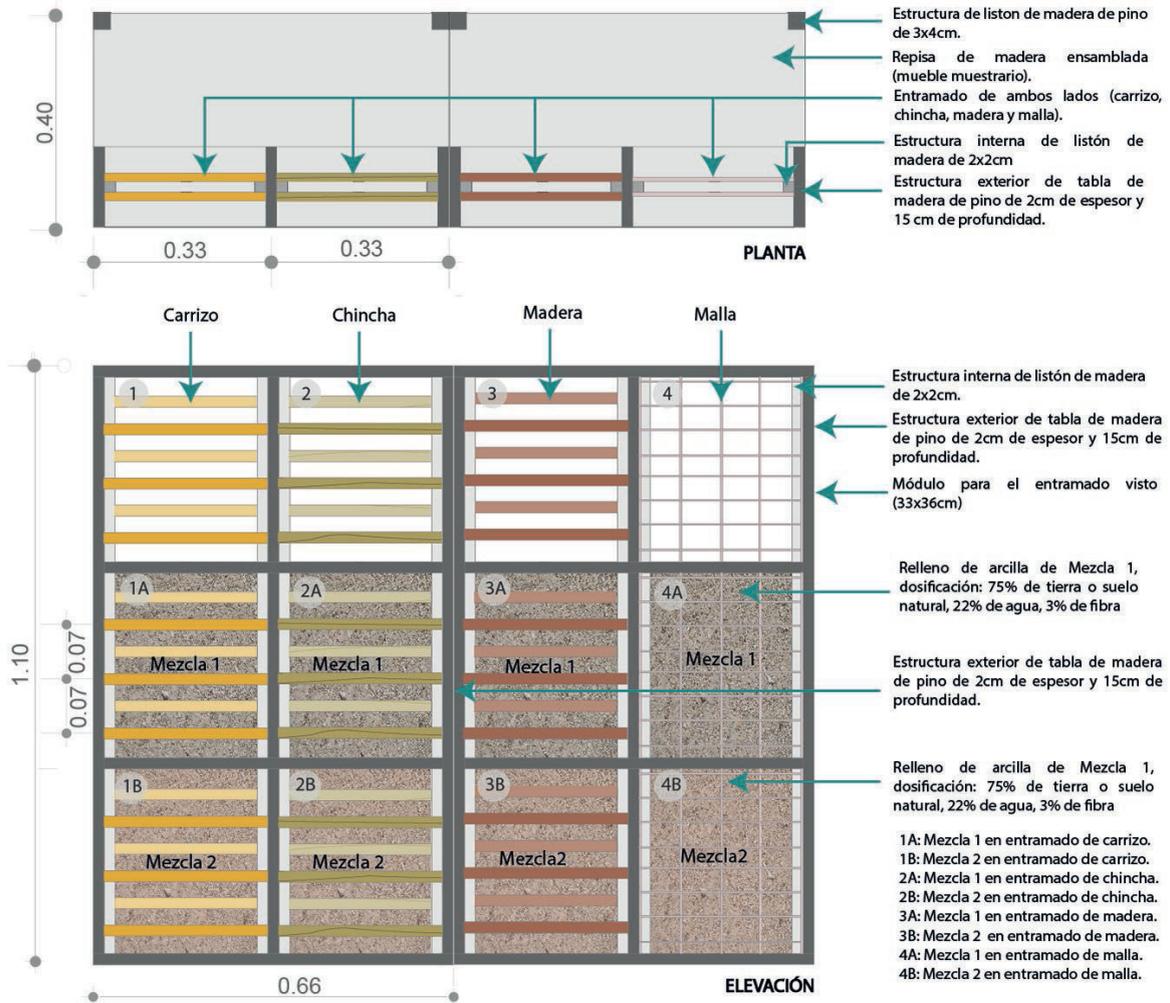
## METODOLOGÍA

Esta investigación tiene un enfoque mixto: cualitativo y cuantitativo, ya que combina el análisis descriptivo y experimental con la validación práctica y comunitaria. El desarrollo se organizó en cuatro etapas principales: selección y análisis de materiales; diseño y análisis estructural del panel de bahareque; propuesta de aplicación y taller práctico; seguimiento y evaluación.

### SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE MATERIALES

Se realizó la selección de los suelos, material para entramados y fibras de la localidad, el análisis de sus características físicas, evaluación de resistencia a la compresión y pruebas de adherencia.

Se tomaron dos muestras de suelo, la muestra 1 fue tomada cerca del Parque Saludable de Saraguro, donde posteriormente se construyeron los paneles de bahareque, la muestra 2 de la comunidad de Las Lagunas, donde después se desarrolló el taller práctico.



**DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA:**  
 75% de tierra= 13807,76g (30lb)  
 22% de agua= 4000g (4 lt)  
 3% de fibras= 544,56g (1 1/2 lb)



Por cada 200 gr (30 libras de tierra, 4 litros de agua y una libra y media de fibra: 0,75lb de hojas de pino, 0,75lb de hoja de puquíu.

PROCESO DE COLOCACIÓN DE LA MEZCLA DE BARRO, FIBRAS Y AGUA EN LOS ENTRAMADOS



Figura 2. (a) Planta y elevación del muestrario de entramado. (b) Preparación de la mezcla dosificada. (3) Aplicación de la mezcla en los entramados de carrizo, chincha, madera y malla. Fuente: Elaboración de los Autores.

La proximidad a construcciones de tierra existentes, la cercanía al sitio de construcción y la disponibilidad de suelos adecuados fueron los criterios para la elección de estos lugares.

Las pruebas de campo y laboratorio de las muestras incluyeron el análisis granulométrico, del contenido de humedad, de los límites líquidos y de plasticidad. Paralelamente se realizaron ensayos de sedimentación en campo para analizar las propiedades del suelo en condiciones húmedas y clasificarlo según su textura. Este procedimiento posibilita clasificar los suelos en franjas de

arcilla, limo o arena, determinándose su aplicabilidad en diversas técnicas constructivas (Pahaut et al., 2020).

El ensayo de campo del rollo se realizó para identificar de manera simple la cantidad de arcilla en las muestras de suelo y determinar las dosificaciones adecuadas para su uso en el sistema constructivo: se muele la muestra de tierra hasta obtener un material fino, se añade agua para formar una pasta y se forma un rollo de 2 cm de diámetro. La ruptura del rollo se evaluó según el protocolo de la Pahaut et al. (2020): a los 7 cm la arcilla es insuficiente; entre 7 y 14 cm es ideal y a más de 14 cm es excesiva.

Se elaboraron cuerpos de prueba de tierra con fibras de paja de páramo, hojas de pino y puquín (hojas secas de la mazorca de maíz), se utilizó la normativa española UNE-EN 1015-11:2000/A1 (2007) que establece los métodos de ensayo para la determinación de la resistencia a flexión y compresión en morteros para albañilería, con adaptaciones para materiales como la tierra, tomadas de la metodología de análisis utilizada por Gonzalo Sánchez (2012).

Según la norma, se utilizó la dosificación de 75% de tierra o suelo natural, 22% de agua y 3% de una mezcla de fibras secadas naturalmente (8g de fibra por 200g de tierra) para realizar cinco probetas de 10x5x5 cm por cada muestra de suelo, fueron secadas durante siete días y luego sometidas a pruebas de compresión en el laboratorio.

Además, se realizó un análisis de adherencia mediante la construcción de paneles modulares con diferentes tipos de entramados (Gonzalo Sánchez, 2012). En cada módulo, se aplicó una mezcla de barro con fibras de paja de páramo, pino y puquín (1,5g de cada fibra). A lo largo

de tres semanas, se monitoreó la adherencia de cada mezcla en los distintos entramados (Figura 2).

Se evaluó la adherencia de la mezcla de tierra, fibras naturales y el chagleado sobre distintos entramados, y se observó el nivel de fisuramiento en un espesor de 12 cm. En el método tradicional del pueblo kichwa Saraguro, el uso de la chincha (bambú andino o zuro) ofrece alta adherencia por su superficie rugosa e irregular, lo que reduce la separación entre materiales. Para comparar su desempeño, se aplicaron ensayos similares sobre los listones de madera rectangular, malla de gallinero y carrizo pelado. Estas pruebas evidencian la diferencia en la cohesión de los materiales resaltándose la eficacia del sistema tradicional (Gonzalo Sánchez, 2012).

### DISEÑO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PANEL DE BAHAREQUE

El diseño formal del panel se basó en la técnica del sistema constructivo de bahareque *galluchaki* y estéticamente en la iconografía andina, reflejada en los gráficos compuestos por elementos diagonales y sucesivos, presentes en

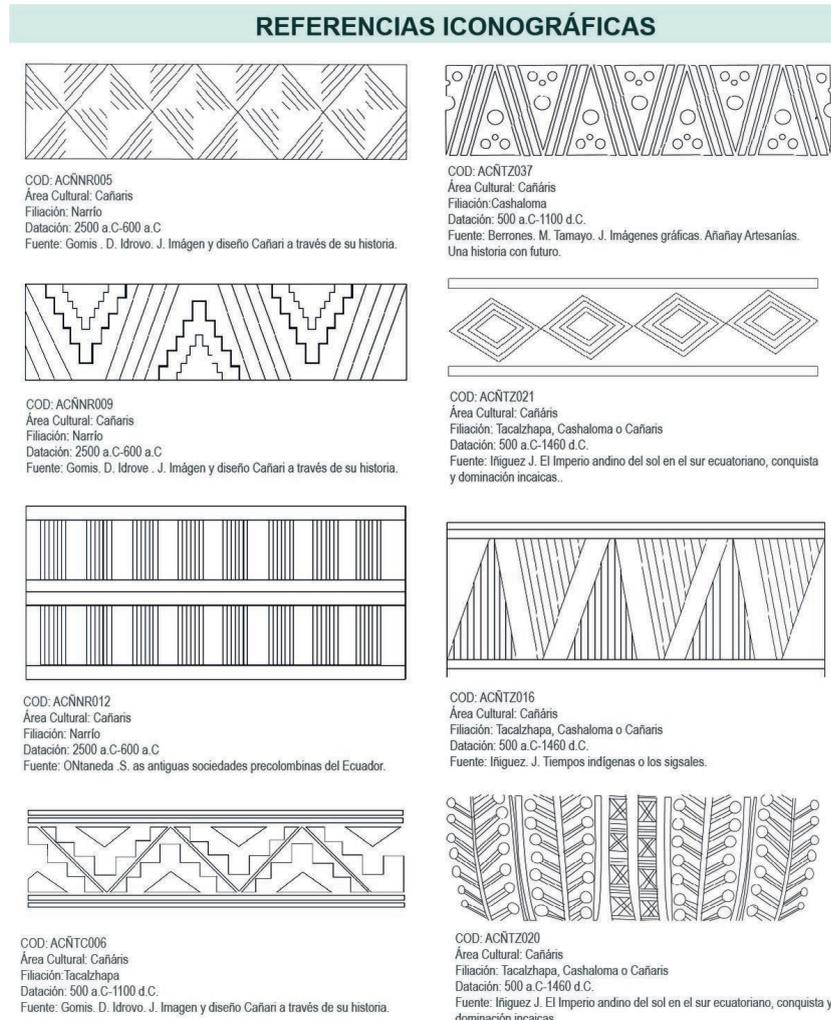
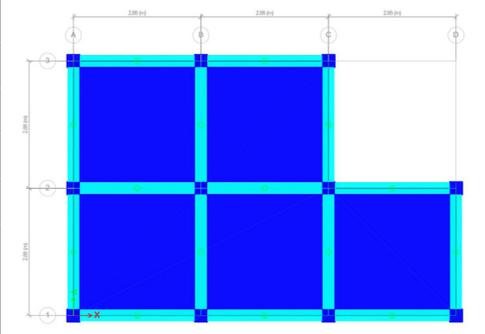
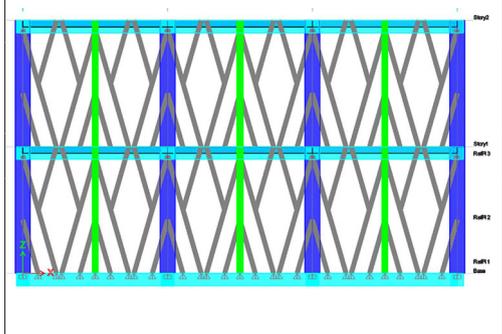


Figura 3. Referencias iconográficas para el desarrollo de propuestas de geometría estructural de panel de bahareque. Fuente: Imagen extraída de Martínez et al., (2015).

Tabla 1. Propiedades del eucalipto para la estructura de paneles. Fuente: Junta del Acuerdo de Cartagena (1984).

Tipo : B	Propiedad	Valor
EMIN	Módulo de elasticidad.	75 000 kg/cm <sup>2</sup>
PE	Peso específico	1 000 kg/m <sup>3</sup>
EPROM	Módulo de elasticidad	100 000 kg/cm <sup>2</sup>
FM	Resistencia a momento	150 kg/cm <sup>2</sup>
FC	Resistencia a compresión paralela	110 kg/cm <sup>2</sup>
FC P	Resistencia a compresión perpendicular	28 kg/cm <sup>2</sup>
FV	Resistencia a corte paralelo	12 kg/cm <sup>2</sup>
FT	Resistencia a tracción paralela	105 kg/cm <sup>2</sup>

Tabla 2. Modelo de análisis con sistema de pórticos de hormigón armado. Fuente: Elaboración de los Autores.

Detalle	Valor	Planta	Elevación Frontal
Número de pisos	2		
Altura entrepiso	2.52 m		
Distancia entre ejes X	2.88 m		
Distancia entre ejes Y	2.88 m		
Irregularidad en planta	Sí		
Irregularidad en elevación	No		

textiles del pueblo Kichwa Saraguro y del vecino pueblo Kichwa Cañari (Figura 3).

El diseño del panel consideró la posibilidad de adaptarlo a estructuras de pórticos de madera, hormigón armado, metálicas o incluso muros portantes de piedra o adobe. La propuesta buscó optimizar el uso de materiales, reducir costos, tiempos de construcción y usar materiales accesibles en el mercado local.

Se analizó la resistencia del panel con el software SAP2000, que consideró que el material estructural es la madera de eucalipto, con las propiedades indicadas en la Tabla 1.

Se analizó estructuralmente la interacción entre los paneles de madera y una estructura aporticada. Se incorporó los paneles tipo de bahareque a un sistema aporticado de hormigón armado para evaluar su impacto en la transmisión de cargas y en la rigidez de la estructura (Tabla 2), se incluyó cargas gravitacionales y sísmicas.

Se aplicaron las normas NEC-SE-DS (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda [MIDUVI], 2014a) para análisis sísmico, NEC-SE-GC (MIDUVI, 2014b) para

cargas no sísmicas y NEC-SE-HM (MIDUVI, 2014c) para hormigón armado.

Se desarrollaron los detalles constructivos del panel utilizando Archicad, se procuró facilitar la prefabricación / montaje y reducir el tiempo de embarado.

El prototipo del panel se construyó con base en los resultados obtenidos, se utilizó madera de eucalipto y chinchu. Para la primera capa de relleno se empleó tierra de las muestras 1 y 2 en proporciones iguales, combinada con fibras como puquín y hojas de pino. Para el revoque se utilizó la muestra 1 con 15 % de fibras finamente picadas y aditivos naturales como miel de caña, sábila y cola blanca.

El análisis de precios unitarios - APU de un panel se realizó después de su construcción, cuando se tuvieron claros los rendimientos.

### PROPUESTA DE APLICACIÓN - TALLER PRÁCTICO

Se desarrollaron tres propuestas de aplicación del panel en diferentes tipos de pórticos, para mostrar posibilidades de integración en estructuras de madera, hormigón o

metálicas. Para ello, se utilizó la distribución de pórticos utilizada en el análisis estructural. Como herramienta para visualización se utilizó Archicad.

Para divulgar la propuesta y evaluar su viabilidad de construcción mediante mingas se desarrolló un taller práctico donde participaron estudiantes, padres de familia que son miembros de la comunidad, docentes y profesionales en arquitectura. El taller se realizó en dos días, inició con una introducción sobre la importancia de la bioconstrucción en la actualidad. Luego, se explicaron los procedimientos para identificar los tipos de suelo. Se prepararon las fibras naturales y se realizó el batido del barro, que se aplicó como primera capa en una pared del Centro Educativo Comunitario *Inti Raymi* (CECIB *Inti Raymi*). Finalmente, se preparó y aplicó el mortero para revoque y empañetado con aglomerantes y fibras naturales en una pared de bahareque de la Casita Andina, un espacio ceremonial de la escuela comunitaria.

## SEGUIMIENTO / EVALUACIÓN

Para evaluar el impacto técnico, social y cultural del taller práctico, se planteó un proceso de seguimiento longitudinal desde una perspectiva de observación participante. Dada su pertenencia al equipo técnico comunitario de Chukidel Ayllullacta, la investigadora principal se encuentra en una posición estratégica para documentar de manera continua la apropiación y réplica del sistema constructivo en diferentes escalas del territorio.

### EL SEGUIMIENTO CONTEMPLA:

- Registro de procesos espontáneos de adopción del sistema, especialmente por familias o colectivos que no participaron directamente en el taller.
- Evaluación del nivel de comprensión y reproducción autónoma de las técnicas enseñadas.
- Identificación de mejoras o adaptaciones realizadas por los usuarios.
- Observación de las dinámicas sociales y simbólicas asociadas a la construcción con bahareque.

Este proceso permite valorar no solo la eficacia técnica del sistema, sino también su potencial transformador como herramienta de revitalización arquitectónica, social y cultural en el territorio. Se presta especial atención a la manera en que los saberes constructivos tradicionales se resignifican en contextos contemporáneos, y cómo la práctica colectiva (minga) favorece su transmisión intergeneracional.

En síntesis, esta metodología integra el diseño técnico, la experimentación constructiva y la evaluación sociocultural, en un proceso holístico que articula conocimiento académico y comunitario en torno a la arquitectura vernácula del pueblo Kichwa Saraguro.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### ANÁLISIS DE MATERIALES

El análisis granulométrico de los suelos en laboratorio indicó que la composición de la muestra 1, con un contenido de humedad del 17.71%, fue 67.3% de arena y 32.7% de finos; mientras que de la muestra 2, con un contenido de humedad del 32.69% fue 1% de grava, 19.4 % de arena y 79.6% de finos (limo y arcilla).

Al comparar los resultados de la prueba de sedimentación con los de laboratorio se obtuvieron datos similares, en la pirámide de clasificación de suelos (Pahaut et al., 2020) se observa que la muestra 1 corresponde a un suelo franco arenoso, mientras que la muestra 2 está en el límite de un suelo franco limo arcilloso y franco arcilloso. Lo que quiere decir que la Muestra 1 es más recomendable para revoques, y la muestra 2 para rellenos (Figura 4).

En el ensayo del rollo (Figura 5), en la muestra 1, con dosificación única, la ruptura promedio fue a los 8 cm, ideal para bahareque; con 1 parte de arena y 1 parte de arcilla, fue a 6 cm, adecuado para revoques. En la muestra 2, sin ruptura en tres pruebas, indica alta cantidad de arcilla, ideal para orfebrería, pero para bahareque necesita más fibra para evitar fisuras; con 1 parte de arcilla y 2 partes de arena, ocurrió a 11 cm, adecuada para bahareque, y con 1 parte de arcilla y 3 partes de arena, a 7 cm, apropiada para revoques. Esta arcilla también puede usarse en pinturas y empañetados, que proporciona acabados brillantes.

En los ensayos de laboratorio de resistencia a la compresión de las barras (Tabla 3). Los resultados demuestran que las fibras aumentan significativamente la resistencia de las muestras, al ser las hojas de pino y puquín las más efectivas, lo que justifica su uso en la construcción de paneles. Se descartó la paja de páramo, debido a su rol ecológico en los páramos andinos, donde es esencial para la conservación del agua. En su reemplazo se optó por usar hojas de pino y puquín, materiales que ofrecen una alternativa viable a la paja y un menor impacto ambiental.

En las pruebas de adherencia los materiales demostraron ser adecuados para los entramados, pero presentaron comportamientos diferentes en cuanto a adherencia con la primera capa de barro y fibra:

- **Carrizo:** adherencia alta debido a su superficie lisa y redonda, pero se ve afectada por la retracción del barro, su falta de irregularidades o porosidad impide una fijación completa, por lo que se genera un agrietamiento entre ambos materiales. Para mejorar su desempeño se recomienda dividir los caños gruesos y orientar la cara más porosa hacia el barro.
- **Chincha:** adherencia favorable gracias a sus caños anchos y su superficie exterior semi lisa y más porosa, tuvo mejor interacción con el barro y la fibra ya que el agrietamiento entre los materiales es mínimo.

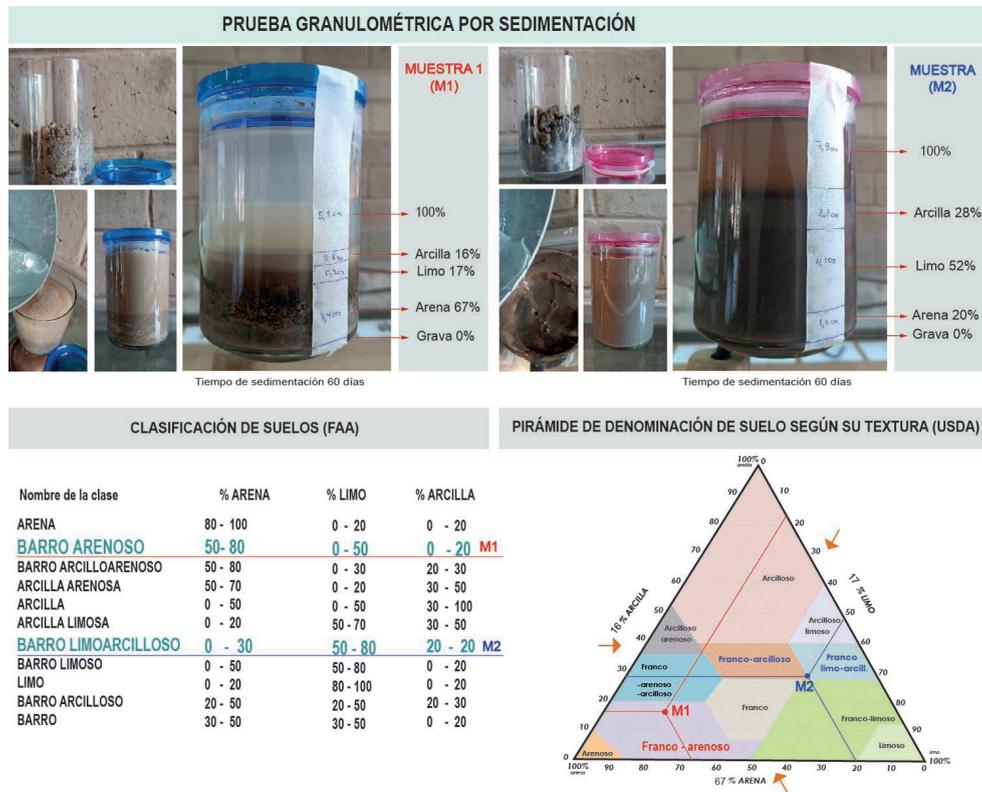


Figura 4. Resultados de granulometría de las muestras 1 y 2 en la pirámide de clasificación de suelos según su textura. Fuente: Elaboración de los Autores basada en Pahaut et al. (2020).



Figura 5. Ensayo de campo tipo rollo (a) Muestra 1; (b) Muestra 2. Fuente: Elaboración de los Autores basada en Pahaut et al. (2020).

Tabla 3. Resultados de la resistencia a la compresión en barras, muestras 1 y 2. Fuente: Elaboración de los Autores.

	Descripción	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )
Muestra 1	Vacía	33.75	1455	43.11
	Paja	45	15460	343.56
	Pino	45	13876	308.36
	Puquín	45	27040	600.89
	3 fibras	45	10029	222.87
Muestra 2	Vacía	33.75	2975	88.15
	Paja	45	13325	296.11
	Pino	45	14622	324.93
	Puquín	45	22205	493.44
	3 fibras	45	13405	297.89

Se sugiere usar la chinchá de forma inversamente proporcional para asegurar un secado eficiente con mínima retracción.

- **Madera:** la alta porosidad en sus caras favorece la adherencia con el relleno. Los listones, colocados entre 5 a 7 cm de distancia, retienen las fibras y evitan el deslizamiento y agrietamiento durante el secado.
- **Malla:** excelente adherencia debido a la estructura metálica y el pequeño diámetro de sus varillas, pero se advirtió que no es un material autóctono y puede sobrecalentarse, lo que afecta la humedad interna del barro. Se recomienda usarla en revoques interiores donde hay menor exposición al sol para evitar agrietamientos desfavorables.

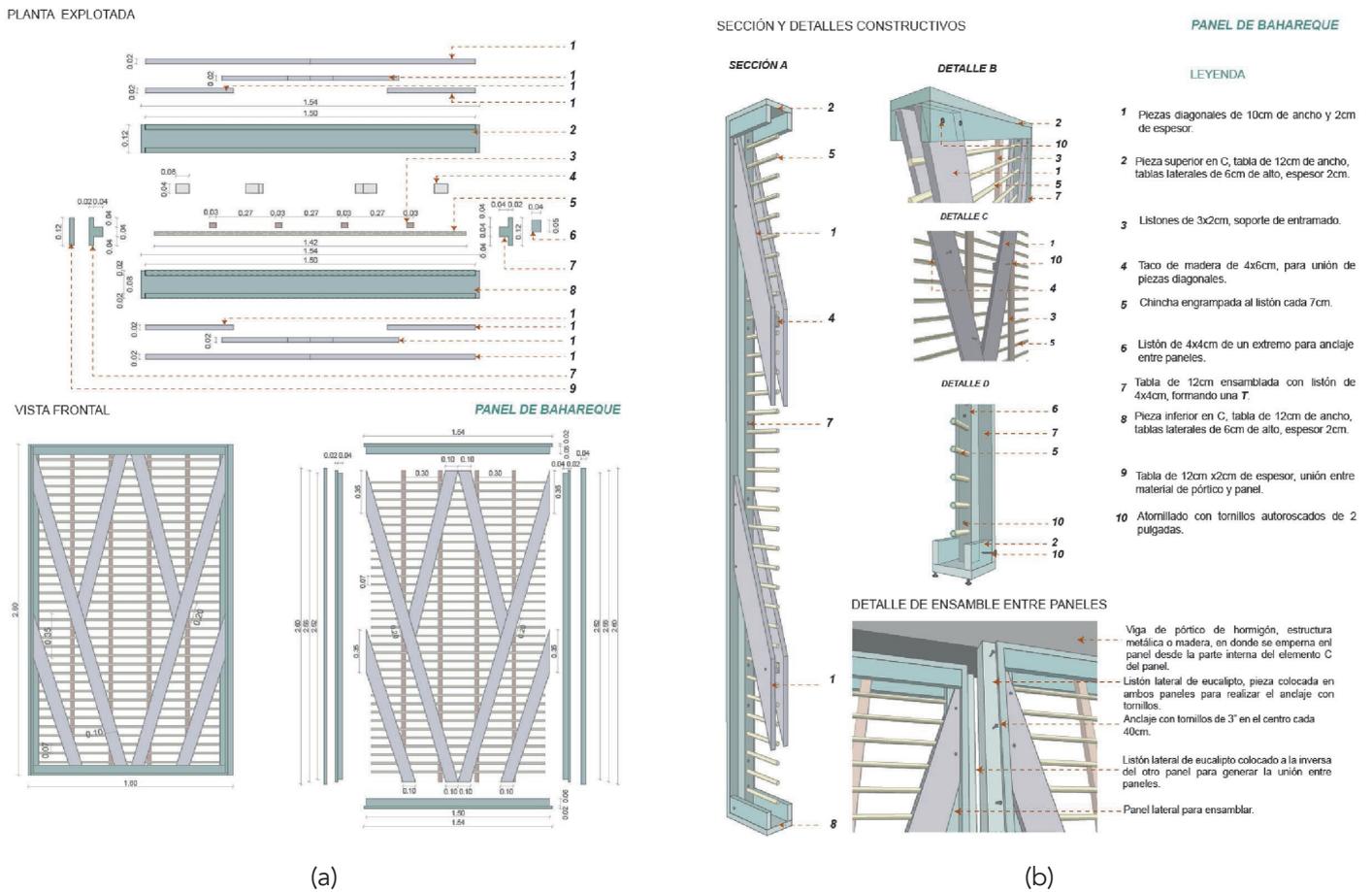
### DISEÑO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PANEL DE BAHAREQUE

El diseño del panel de bahareque incorpora elementos geométricos derivados de la iconografía andina como triángulos, rombos y figuras de simetría axial. Estos patrones no solo enriquecen simbólicamente la propuesta, sino que también cumplen una función estructural ya que, los triángulos y rombos se integran como diagonales externas y refuerzos internos del entramado, que aportan rigidez y estabilidad al panel. De esta manera, se fusiona la funcionalidad estructural del sistema con la simbología y cosmovisión andina.

Se identificó un símbolo abstracto de la mazorca de maíz y patrones geométricos presentes en los textiles y festividades de la cultura Kichwa Saraguro (Figura 6). Estos representan la dualidad de la vida, el equilibrio y el orden cósmico, los que fueron adaptados para construir un sistema estructural contemporáneo. En idioma Kichwa, *Sara* (maíz) y *Kuru* (gusano), lo que enriquece aún más el significado cultural de la propuesta.



Figura 6. Análisis iconográfico y concepto de diseño de geometría. Fuente: Elaboración autores en base a Martínez et.al, 2015 e Inga, 2021.



(a)

(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 7. Panel propuesto (a) despiece; (b) detalles; (c) Fotografías del proceso constructivo y (d) resultado final del panel. Fuente: Elaboración de los Autores.

Tabla 4. Comprobaciones por resistencia al pandeo elástico y resistencia a compresión. Fuente: Elaboración de los Autores.

Elemento	Diámetro sección (m)	Longitud efectiva (m)	Pandeo crítico Pcr (kg)	Resistencia compresión (fc= 110 kg/cm <sup>2</sup> )	Axial máximo (Kg-m)	Estado
Marco vertical	0,12	1,6	39242	12441	1806	Cumple
Diagonal principal	0,8	2,43	3356	5529	474	Cumple

Tabla 5. Comprobación de resistencia a flexión. Fuente: Elaboración de los Autores.

	Diámetro sección (m)	Resistencia a momento (Kg-m)	Momento máximo (Kg-m)	Estado
Marco vertical	0,12	509	22	Cumple
Marco horizontal superior	0,12	509	727	Cumple
Diagonal principal	0,8	151	116	Cumple

Los paneles que conforman la estructura están hechos de listones de eucalipto de 3x4 cm (elemento que sujeta el chagleado), 4x4 cm (elemento para unir los paneles) y tablas de 12x2 cm, su construcción e instalación se simplifica mediante el uso de tornillos autorroscantes, grampas y masilla de cola blanca. La Figura 7 muestra la propuesta constructiva del panel.

Con el análisis estructural del panel se pudo verificar que cumple con los requisitos de resistencia al pandeo elástico, compresión y flexión. Los datos obtenidos se presentan en las Tabla 4 y Tabla 5.

### ANÁLISIS ESTRUCTURAL PARA APLICACIÓN DE LOS PANELES EN PÓRTICOS

La inclusión de paneles de bahareque en estructuras con pórticos reduce el período de vibración de 0,31s a 0,21s, lo que mejora la respuesta sísmica al disminuir la flexibilidad y las fuerzas sísmicas actuales. Si bien este efecto puede ser favorable, requiere de un análisis particular en cada caso ya que los paneles de madera y los pórticos (de hormigón, metálicos o de tierra) disparan energías de forma distinta. Cuando los paneles no tienen función estructural, los pórticos deben diseñarse conforme a la normativa correspondiente. Además, es necesario prever una junta técnica entre el panel y el pórtico para evitar rigideces no deseadas o efectos adversos.

La fijación del panel al pórtico se realiza mediante una pieza intermedia de madera (tablón de anclaje de 0,12m x 0,04m) que se emperna previamente al pórtico existente, ya sea de hormigón, metal o tierra. Esta pieza

actúa como conector flexible, protege la integridad del panel y facilita su montaje. En la base del sistema se debe tener un sobrecimiento de piedra, o una viga solera de madera, anclada al piso o cimentación, que nivela y aísla el panel del contacto directo con el suelo, que permite conservar el nivel de humedad natural de los materiales del panel. Este sistema modular de unión posibilita adaptar los paneles a distintos tipos de estructuras sin comprometer su comportamiento ni sus propiedades físicas.

### PROPUESTA DE APLICACIÓN

Para visualizar la aplicación de los paneles se realizaron propuestas de vivienda en que se usó la misma distribución de pórticos utilizada en los ensayos estructurales, para viviendas de una, dos y tres plantas (Figura 8).

- **Pórticos de madera:** Se propone una solución para viviendas de una planta que integra paneles de bahareque en estructuras convencionales de madera. Esto permite reducir la cantidad de madera requerida, que mantiene la estabilidad y funcionalidad.
- **Pórticos de hormigón armado:** La aplicación de paneles de bahareque es viable en este sistema, con modificaciones en la altura de los paneles y en la distribución de los pórticos para adaptarse a edificaciones de dos niveles.
- **Pórticos de estructura metálica:** En construcciones de hasta tres niveles, los paneles de bahareque ofrecen una solución eficiente y sostenible que maximiza el uso de materiales locales y se integra a la estructura metálica.

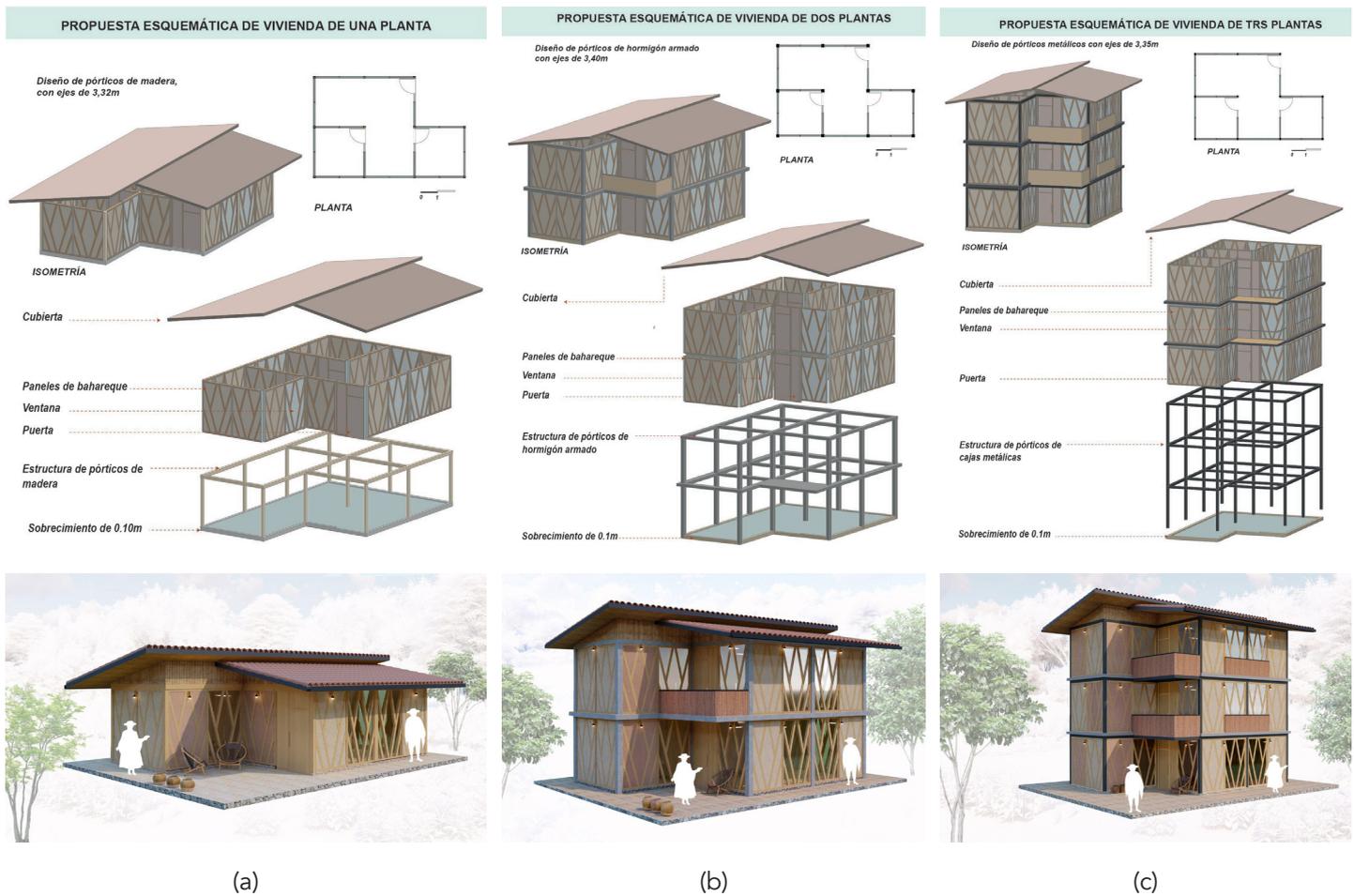


Figura 8. Aplicación esquemática de paneles (a) vivienda planta única; (b) Vivienda dos plantas; (c) Vivienda tres plantas.  
 Fuente: Elaboración de los Autores.

## ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO DE PANEL DE BAHAREQUE

El análisis de precios unitarios para un panel de bahareque de 1,60 m x 2,60 m considera cuatro componentes: equipos, mano de obra, materiales y transporte. Se incluye un 5% por herramientas manuales (\$0,05 USD) y la participación de un peón y un albañil, con un costo total de \$10,01 USD. Los materiales (madera de eucalipto, tornillos, chinchas, barro con fibras, entre otros) suman \$132,00 USD. El transporte representa \$3,00 USD. El costo directo asciende a \$145,06 USD, al que se añaden 15% por costos indirectos (\$21,76 USD) y un 5% de utilidad (\$7,25 USD), que alcanza un total de \$174,07 USD como valor ofertado.

Este monto corresponde al costo por unidad del panel (4,16 m<sup>2</sup>), equivalente a \$41,84 USD por metro cuadrado. Al compararlo con una pared de bloque, que cuesta \$64,39 USD por metro cuadrado (incluye revestimiento, empastado y pintura), el panel de bahareque resulta un 35 % más económico. Si bien los acabados en madera podrían aumentar el valor final, el uso de materiales reciclados y locales contribuye a mantener bajos los costos, que posiciona al bahareque como una alternativa viable y accesible dentro de la construcción sostenible.

## APLICACIÓN – SOCIALIZACIÓN

En el taller de bioconstrucción en el CECIB *Inti Raymi* participaron aproximadamente 50 personas. El evento se desarrolló en dos días, con una hora dedicada al taller teórico y 15 horas al taller práctico. Esta actividad facilitó la transmisión de conocimientos ancestrales sobre construcción, ya que promovió la interacción entre generaciones y creó un ambiente de aprendizaje colectivo. Estudiantes de los últimos niveles educativos, jóvenes arquitectos locales y de otras ciudades trabajaron juntos, al superar las barreras de edad, género y nivel académico.

La bioconstrucción no se limita a fórmulas fijas, sino que debe ser un proceso experimental y vivencial, como lo enfatiza Guerrero Baca (2017). Los participantes aprendieron sobre la preparación del barro, la dosificación de suelos y experimentaron con fibras locales para mejorar la técnica constructiva. Este evento permitió a los más jóvenes reconectar con la *allpa mama* (madre tierra) y fortalecer su sentido de pertenencia con la comunidad y cultura. Además, subrayó la importancia de la sostenibilidad y el cuidado del medio ambiente, al crear conciencia sobre



Figura 9. Imágenes del taller de aplicación. Fuente: Elaboración de los Autores.

la necesidad de preservar las prácticas constructivas ancestrales y promover el uso responsable de los recursos locales (Figura 9).

### EVALUACIÓN - IMPACTO EN LA COMUNIDAD

Después del desarrollo del taller, se realizó una coordinación con las autoridades comunitarias por la construcción de nuevos espacios que fomenten la participación colectiva y las mingas comunitarias. Asimismo, en su ejercicio profesional, se observó un creciente interés en el uso de materiales locales para proyectos familiares. La difusión de estos procesos colaborativos ha motivado a cabildos de comunidades como Chukidel Ayllullacta, Gera e Ilincho del pueblo Kichwa Saraguro, cantón Saraguro, provincia de Loja, sur del Ecuador, entre otras, a retomar las mingas comunitarias para construir nuevos espacios y revitalizar los existentes.

Tras la socialización del proceso constructivo, a través del taller práctico de tierra y su difusión en canales digitales del CECIB *Inti Raymi*, se inició un proceso comunitario para edificar una cocina colectiva con bahareque *galluchaki*. Además, se comenzó la construcción de una vivienda unifamiliar en la comunidad, en su forma tradicional con cimentación en piedra, parantes sobre soleras, diagonales de relleno, chagleado de chinchá y carrizo, y embarre con fibras naturales locales. También se planteó un objeto arquitectónico con pórticos metálicos y paneles de bahareque para uso comercial y turístico dentro del contexto comunitario.

Se observa el impacto positivo de promover la preservación del saber constructivo y al mismo tiempo, explorar nuevas combinaciones de materiales y fortalecer la confianza en el uso de recursos locales como la tierra, la madera y la chinchá, las que adaptan el sistema a las necesidades actuales de la población.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sistema constructivo de bahareque del pueblo Kichwa Saraguro, particularmente en su variante *galluchaki*, demuestra una notable capacidad de adaptación estructural y sostenibilidad material. Su implementación permite reducir significativamente el uso de materiales industrializados, al aprovechar las fibras naturales locales y métodos ancestrales de bajo impacto ambiental. La identificación adecuada del suelo, la dosificación precisa de los componentes y la incorporación de entramados vegetales han abierto posibilidades para aplicaciones innovadoras en geometrías estructurales, acabados arquitectónicos y la conservación activa de la identidad cultural.

Esta investigación contribuye al estado del arte al sistematizar prácticas constructivas que integran valor material e inmaterial, que reconocer al bahareque no solo como una técnica, sino también como expresión cultural viva. Su aplicación contemporánea no solo conserva lo edificado, sino que reactiva prácticas y ritualidades

comunitarias, que establecen un puente entre el conocimiento ancestral y las necesidades de hábitat actuales.

Si bien los cálculos estructurales avalan la resistencia de las construcciones, en viviendas de bahareque de uno a tres niveles, su exigencia podría ser flexible según el contexto y las condiciones del proyecto. La comprensión de los principios básicos de pórticos y diagonales es suficiente para garantizar la estabilidad estructural, ya que permite un amplio margen para la experimentación y adaptación de este sistema a diferentes formas arquitectónicas. La viabilidad de estas propuestas dependerá de los factores económicos y el nivel de detalle de la construcción, sin perder de vista las tradiciones locales y su aplicabilidad en el contexto actual.

Las viviendas de bahareque resuelven necesidades habitacionales y son una manifestación de la solidaridad y el trabajo colectivo de los pueblos originarios. A través de esta investigación, se ha demostrado la resistencia, posibilidades de adaptación de los materiales y la aceptación que tienen cuando se promueven procesos participativos para divulgar adecuadamente la técnica constructiva y sus particularidades.

Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones profundicen en aspectos cuantitativos del sistema, como: densidad y resistencia de las mezclas, peso final por módulo, coeficientes de transmitancia térmica, y estrategias para evitar puentes térmicos entre paneles. Tales datos permitirán afinar los criterios técnicos para su validación normativa, sin comprometer su esencia cultural ni su potencial como solución sostenible para hábitats rurales y periurbanos en los Andes.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRedit

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

## AGRADECIMIENTOS

Artículo desarrollado gracias al financiamiento de AECID - beca para el desarrollo de estudios de maestría e investigación, FO-GDC-120-V.1.0. Primera Cohorte 2022 – 2023.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Calderón, A. (1985). *Saraguro huasi: La casa en la "tierra del maíz"*. Banco Central del Ecuador.

Cevallos Salas (2003). El bahareque en zonas sísmicas. En J. A. Cordero, E. J. Martínez, y C. Martins Neves (Eds.), *Técnicas mixtas de construcción con tierra* (pp. 37-48). Proterra. [https://redproterra.org/wp-content/uploads/2020/06/3\\_PP-T%C3%A9nicas-Mixtas\\_2003.pdf](https://redproterra.org/wp-content/uploads/2020/06/3_PP-T%C3%A9nicas-Mixtas_2003.pdf)

Cordero, J. A., Martínez, E. J., y Martins Neves C. (Eds.). (2003). *Construção com terra*. Catálogo de la exposición proterra. PROTERRA [https://redproterra.org/wp-content/uploads/2020/05/6\\_OA-Exposici%C3%B3n-PROTERRA-CYTED\\_2002-2006.pdf](https://redproterra.org/wp-content/uploads/2020/05/6_OA-Exposici%C3%B3n-PROTERRA-CYTED_2002-2006.pdf)

Corrales Blanco, J. C., Pineda Iriarte, A. P., y Salazar Rodríguez, C. C. (2021). *Revalorización de la arquitectura vernácula. Módulo de vivienda para una comunidad asháninka de Alto Kamonasharii*. *Limaq*, (7), 175–200. <https://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Limaq/article/view/5337/5107>

Cristancho Barrios, K. J. (2024). Análisis del comportamiento de muros en bahareque de tierra ante cargas horizontales [Tesis de Magíster, Pontificia Universidad Javeriana]. Pontificia Universidad Javeriana, Centro de recursos para el Aprendizaje y la Investigación. <https://vitela.javerianacali.edu.co/items/906ec3c8-a336-440f-b985-5cc164bccd34>

Gonzalo Sánchez, V. (2012). Morteros de barro estabilizados con fibras de paja, esparto y sisal para su uso como revestimientos [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio Institucional Universidad Politécnica de Madrid. <https://oa.upm.es/14429/>

Guerrero Baca, L. F. (2017). Pasado y porvenir de la construcción con bahareque. *Gremium*, 4(8), 69-80. <https://doi.org/10.56039/rgn08a07>

ICOMOS (1999). *Carta del Patrimonio vernáculo construido. Ratificada por la 12a asamblea general en México*. <https://culturapedia.com/wp-content/uploads/2020/09/1999-carta-patr-vernaculo.pdf>

Inga, A. (2021). *Arquitectura Kichwa Saraguro: Tradición y futuro*. Universidad Central del Ecuador.

Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC]. (2022). *Resultados del Censo de Población y Vivienda 2022*. [https://www.censoecuador.gob.ec/public/Boletin\\_Nacional.htm](https://www.censoecuador.gob.ec/public/Boletin_Nacional.htm)

Junta del Acuerdo de Cartagena. (1984). *Manual de diseño para maderas del Grupo Andino*. Junta del Acuerdo de Cartagena, Lima, Perú. <https://construccionesuca.wordpress.com/2022/01/05/manual-de-diseno-para-maderas-del-grupo-andino/>

Lozano Guamán, A. K. K. (2016). *Etnografía de la arquitectura vernácula del Pueblo Saraguro* [Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13208>

Lozano Guamán, A. K. K. (2021). *Los valores formales de la arquitectura tradicional del pueblo Saraguro, pertinentes al movimiento moderno: Estudio tipológico de la arquitectura tradicional en la comunidad Lagunas, parroquia Saraguro* [Tesis de maestría, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional Universidad de Cuenca. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/37454>

López-Martínez, O., y Torres Garibay, L. A. (2023). Viviendas de bajareque y adobe en el Istmo de Oaxaca, México: una descripción post sismo. En A. Ferreira, Z. Salcedo Gutierrez, y C. Neves (Eds.). *21° SIACOT- 21° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, Bogotá y Tibasosa-Colombia, 9 al 23 de noviembre de 2023. Memorias* (Vol. 21, pp. 498-507). Proterra. <https://redproterra.org/wp-content/uploads/2024/01/Memorias-com-ISBN-janeiro.pdf>

Marsh, A. T. M., y Kulshreshtha, Y. (2021). The state of earthen housing worldwide: how development affects attitudes and adoption. *Building Research & Information*, 50(5), 485–501. <https://doi.org/10.1080/09613218.2021.1953369>

Martínez, L., González, M., y Herrera, A. (2015). *Iconografía de la cultura Cañari y su influencia en la región andina*. Editorial Abya-Yala.

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda [MIDUVI]. (2014a). *NEC-SE-DS: Peligro Sísmico, diseño sismo resistente*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda [MIDUVI]. (2014b). *NEC-SE-GC: Geotecnia y cimentaciones*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/7.-NEC-SE-GC-Geotecnia-y-Cimentaciones.pdf>

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda [MIDUVI]. (2014c). *NEC-SE-HM: Estructuras de hormigón armado*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/8.-NEC-SE-HM-Hormigon-Armado.pdf>

Pacheco, L. (2007). *Diseño bioclimático en arquitectura vernácula*. Instituto de Estudios Andinos.

Pahaut, B., Brizuela Barros, C., Videla, F., Cuitiño, G., Bellman, L., Peisino, L., Canavesi, L., Matar Arturo, M., Aramburu, M. D., Castaño Llugard, M., Costamagna, P., y Cabrera, S. (2020). *Protocolo de ensayos de campo para la identificación de suelos*. Red Argentina Protierra. <https://redprotierra.com.ar/wp-content/uploads/2020/11/Protocolo-de-ensayos-de-campo-para-la-identificaci%C3%B3n-de-suelos.pdf>

Neves, C., Salcedo Gutierrez, Z., y Borges Faria, O. (Eds.). (2017). *17° SIACOT Tierra identidades – 17° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, “Tierra – Identidades”, Memorias*. PROTERRA. <https://redproterra.org/wp-content/uploads/2020/06/17-SIACOT-Bolivia-2017.pdf>

Pesántez Pesántez, J. F., y Tapia Vera, C. M. (2018). Una alternativa constructiva: pisos de tierra con fibra de cabuya y cascarilla de arroz. *Memorias del Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra - SIACOT*, (18), 148-157. <https://revistas.udelar.edu.uy/OJS/index.php/msiacot/article/view/1115>

UNE. (2007). *UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería*.

UNESCO (2003). *Convención para la salvaguardia del patrimonio cultural inmaterial*. <https://culturapedia.com/wp-content/uploads/2020/09/2003-convencion-salvaguardia-patrimonio-inmaterial.pdf>

UNESCO (2024). *Convención para la salvaguardia del patrimonio cultural inmaterial*. <https://ich.unesco.org/es/convenci%C3%B3n>

Vacacela Albuja, N. P., y Astudillo Cordero, J. P. (2015). *Paneles de bahareque prefabricado y aplicación a una vivienda* [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Red de Repositorios Latinoamericanos. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1130507>



# INVESTIGACIÓN DE APLICACIONES DE MICROALGAS EN FACHADAS DE EDIFICIOS: UNA PERSPECTIVA BIBLIOMÉTRICA

Recibido 13/05/2025  
Aceptado 19/06/2025

## EXPLORING MICROALGAE APPLICATIONS IN BUILDING FACADES: A BIBLIOMETRIC PERSPECTIVE

## ESTUDO DE APLICAÇÕES DE MICROALGAS EM FACHADAS DE EDIFÍCIOS: UMA PERSPECTIVA BIBLIOMÉTRICA

### Aslı Taş

Doctor of Philosophy  
Assistant professor Faculty of Engineering and Architecture  
Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Nevşehir, Turkey  
<https://orcid.org/0000-0003-0408-1533>  
aslydz@gmail.com

### Güneş Mutlu-Avinç

Doctor of Philosophy  
Assistant professor Faculty of Engineering and Architecture  
Muş Alparslan University, Muş, Turkey  
<https://orcid.org/0000-0003-1049-2689>  
gunesavinc@gmail.com



## RESUMEN

Las microalgas son microorganismos con un gran potencial para su aplicación en tecnologías medioambientales sustentables por su capacidad de fotosintetizar, producir biomasa, absorber dióxido de carbono y tratar aguas residuales. Estas propiedades versátiles permiten integrar las microalgas en los sistemas arquitectónicos de fachadas. Los fotobiorreactores que pueden integrarse en la fachada cumplen funciones como la generación de energía, la mejora de la calidad del aire, el sombreado y el tratamiento de aguas residuales. En este contexto, aunque existen muchos estudios bibliométricos en la literatura sobre el uso de microalgas en los campos medioambiental e industrial, no hay ningún estudio bibliométrico exhaustivo que se centre en el uso de microalgas en diseños de fachadas arquitectónicas. Este estudio pretende revelar sistemáticamente las tendencias de la investigación en este campo examinando la bibliografía sobre el uso de microalgas en fachadas de edificios y sistemas de revestimiento mediante un análisis bibliométrico. Según los resultados de la investigación, la literatura científica sobre el uso de microalgas en fachadas de edificios ha aumentado rápidamente en los últimos años con colaboraciones interdisciplinarias y se centra en los temas de sustentabilidad, eficiencia energética e interacción biológica. Los estudios publicados entre 2012 y 2024, liderados por países como Alemania, Estados Unidos, China y Países Bajos, se configuran en torno a palabras clave como microalgas, biorreactor, fachada verde, y biointegración, centrados en la eficiencia energética, la sustentabilidad y la biotecnología de la construcción. Como resultado, esta investigación hace visible la posición actual de las tecnologías de microalgas y ofrece recomendaciones estratégicas para orientar futuros trabajos académicos.

### Palabras clave

microalgas, fotobiorreactor, arquitectura sostenible, diseño de fachadas, análisis bibliométrico, biomasa, producción de energía

## ABSTRACT

Microalgae are microorganisms that offer promising potential for application in sustainable environmental technologies due to their ability to photosynthesize, produce biomass, absorb carbon dioxide, and treat wastewater. These versatile properties allow microalgae to be integrated into architectural façade systems. Photobioreactors that can be integrated into architectural facades can be used for energy generation, air quality improvement, shading, and wastewater treatment. In this context, although there are many bibliometric studies in the literature on the use of microalgae in environmental and industrial applications, no comprehensive bibliometric study focuses on the use of microalgae in architectural facade designs. This study aims to systematically reveal the research trends in this field by examining the literature on the use of microalgae in building facades and cladding systems through bibliometric analysis. According to the research findings, the scientific literature on the use of microalgae in building facades has been increasing rapidly in recent years, with interdisciplinary collaborations focusing on the themes of sustainability, energy efficiency, and biological interaction. The studies published between 2012 and 2024, with leading contributions from countries such as Germany, the USA, China, and the Netherlands, are shaped around keywords such as microalgae, bioreactor, green facade, bio-integration, with a focus on energy efficiency, sustainability, and building biotechnology. As a result, this research makes the current position of microalgae technologies visible and provides strategic recommendations to guide future academic work.

### Keywords

microalgae, photobioreactor, sustainable architecture, façade design, bibliometric analysis, biomass, energy production

## RESUMO

As microalgas são microorganismos que apresentam um potencial promissor para aplicação em tecnologias ambientais sustentáveis devido à sua capacidade de fotossíntese, produção de biomassa, absorção de dióxido de carbono e tratamento de águas residuais. Essas propriedades versáteis permitem que as microalgas sejam integradas aos sistemas de fachadas arquitetônicas. Os fotobiorreatores que podem ser integrados às fachadas arquitetônicas podem ser usados para geração de energia, melhoria da qualidade do ar, sombreamento e tratamento de águas residuais. Neste contexto, embora existam muitos estudos bibliométricos na literatura sobre o uso de microalgas em aplicações ambientais e industriais, nenhum estudo bibliométrico abrangente enfoca o uso de microalgas em projetos de fachadas arquitetônicas. O objetivo deste estudo é identificar de forma sistemática as tendências de pesquisa nesse campo, por meio da análise bibliométrica da literatura sobre o uso de microalgas em fachadas de edifícios e sistemas de revestimento. De acordo com os resultados da pesquisa, a literatura científica sobre o uso de microalgas em fachadas de edifícios tem aumentado rapidamente nos últimos anos, com colaborações interdisciplinares focadas nos temas de sustentabilidade, eficiência energética e interação biológica. Os estudos publicados entre 2012 e 2024, com contribuições importantes de países como Alemanha, EUA, China e Países Baixos, concentram-se em palavras-chave como microalgas, biorreator, fachada verde, biointegração, com foco em eficiência energética, sustentabilidade e biotecnologia aplicada à construção. Assim, esta pesquisa torna visível o estágio atual das tecnologias de microalgas e oferece recomendações estratégicas para orientar futuros trabalhos acadêmicos.

### Palavras-chave:

microalgas, Fotobiorreactor, Arquitetura Sustentável, Design de Fachadas, Análise Bibliométrica, Biomassa, Produção de Energia

## INTRODUCCIÓN

Las microalgas son algas unicelulares capaces de realizar fotosíntesis y que contienen diferentes pigmentos, especialmente clorofila-a. Producen oxígeno a partir de dióxido de carbono usando la luz solar. Debido a su rápida producción de biomasa, capacidad de absorción de CO<sub>2</sub>, potencial de generación de biocombustibles y efectividad en el tratamiento de aguas residuales, las microalgas se consideran un recurso biológico sustentable con aplicaciones en diversos campos, como la energía, la medicina y la gestión ambiental (Umdy y Univ, 2020). Las microalgas pueden prosperar tanto en entornos naturales como artificiales. Naturalmente, se encuentran en hábitats de agua dulce (lagos, ríos, estanques), aguas salada (mares, océanos, lagunas), suelos húmedos y en la corteza de los árboles. Los sistemas de cultivo artificial incluyen estanques abiertos y fotobiorreactores cerrados. Los sistemas abiertos se instalan al aire libre y utilizan directamente la luz solar. Por el contrario, los sistemas cerrados implican el cultivo controlado de algas dentro de fotobiorreactores de vidrio, tubos o paneles, donde factores como la humedad, la temperatura y la presión se regulan con precisión. En particular, los sistemas de fotobiorreactores cerrados ofrecen un potencial significativo para la integración en aplicaciones arquitectónicas (Carvalho et al., 2014). Cuando se incorporan a las fachadas de los edificios, estos sistemas pueden contribuir a la generación de energía, la mejora de la calidad del aire y el tratamiento de aguas residuales (Öncel et al., 2016; Yaman et al., 2024).

Los fotobiorreactores utilizan la capacidad fotosintética de las microalgas para producir energía en las fachadas de los edificios. Estos reactores producen oxígeno y biomasa, capturando la luz solar y absorbiendo dióxido de carbono a través de paneles, tubos o sistemas de vidrio integrados en la envolvente del edificio. La biomasa creada se transforma luego de diferentes maneras en energía. La biomasa se puede convertir en biogás, que se puede utilizar como combustible, mientras que el biodiésel puede ayudar a satisfacer los requisitos de energía del edificio (Arora et al., 2024; Talaei y Prieto, 2024). Se han desarrollado diferentes tipos y formas de fotobiorreactores para el uso de primera línea de microalgas. Existen varias clasificaciones formales de fotobiorreactores en la literatura. Pueden ser tubulares planos, horizontales y verticales (Yoo et al., 2013); tubular, de losa plana y helicoidal (Yılmaz, 2006); tubular horizontal, tubular vertical, columna vertical y placas planas (Ugwu et al., 2008; Bitog et al., 2011; Wang et al., 2012) o tubular, paneles planos, columna de burbujas vertical y elevador aéreo vertical (Sedighi et al., 2023). Las características de la especie, junto con los requisitos técnicos y medioambientales de la fachada, son determinantes en el uso de fotobiorreactores en fachadas. Sin embargo, las condiciones de luz, temperatura, humedad y mantenimiento difieren dependiendo de las especies de microalgas. Los requisitos de luz, las tasas de crecimiento, las tolerancias de temperatura y las cantidades de producción de biomasa de diferentes especies de algas también varían (Singh y Singh, 2015). Por el contrario, el diseño de la fachada también puede reflejar diferentes necesidades, incluido el clima, la orientación, el control solar, el sombreado y el aislamiento térmico. Por ende, tanto las condiciones apropiadas para que prosperen las algas como las necesidades funcionales y arquitectónicas de la fachada deben considerarse conjuntamente al seleccionar el tipo de fotobiorreactor para la fachada. El rendimiento del

sistema depende mucho de este equilibrio (Huang et al., 2017).

Debido a que las algas pueden producir energía, limpiar aguas residuales y mejorar la calidad del aire, es un tema de investigación crucial para los enfoques arquitectónicos sustentables. Teniendo en cuenta las muchas ventajas de las microalgas, es imperativo realizar más investigaciones sobre su aplicación en fachadas de edificios. En consecuencia, una nueva investigación sobre sistemas de fachadas que utilizan microalgas es crucial para lograr una urbanización sostenible y mitigar el cambio climático. Numerosos estudios de análisis bibliométricos sobre microalgas se han llevado a cabo en la literatura en diversos momentos. El estudio de Rumin et al. (2020) examinó el desarrollo de la investigación sobre microalgas en todo el mundo, en Europa y en la región Euroatlántica de 1960 a 2019. Este estudio analizó 79.020 publicaciones para evaluar la evolución de los temas de investigación, las colaboraciones entre países e instituciones, los conceptos de investigación destacados y en declive, las especies más estudiadas y las revistas relevantes. Purba et al. (2024) analizaron 1.339 artículos de investigación sobre el uso de microalgas en el tratamiento de aguas residuales para la sostenibilidad ambiental desde 1990 hasta noviembre de 2023. Kinawy et al. (2024) realizaron un análisis bibliométrico que abarcó el uso de microalgas en la industria cosmética en las últimas dos décadas. Gao et al. (2022) analizaron 10.201 artículos sobre el uso de algas como biocombustibles entre 1980 y 2019 y evaluaron su desempeño en publicaciones, redes sociales y tendencias de investigación. Silva et al. (2020) analizaron las tendencias de investigación, patentes, industria y mercado sobre pigmentos de microalgas durante la última década. El estudio de Li y Zhu (2021) analizó 2.621 estudios sobre el uso de microalgas en el tratamiento de aguas residuales en los últimos 20 años en cuanto a características de publicación, colaboraciones y tendencias de investigación. Melo et al. (2022) analizaron la investigación bibliométrica sobre el cultivo de microalgas en aguas residuales de industrias agrícolas. Como resultado, los estudios existentes se han centrado en aplicaciones ambientales e industriales de las microalgas, como la producción de energía, la sustentabilidad ambiental o el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, no existe una investigación en la literatura que aborde el uso de microalgas en diseños de fachadas arquitectónicas con un análisis bibliométrico exhaustivo. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo revelar sistemáticamente las tendencias de investigación en el campo, mediante el análisis de la literatura centrada en el uso de microalgas en fachadas de edificios y sistemas de revestimiento con el método de mapeo científico. A este respecto, el estudio tiene como objetivo hacer una contribución única a la literatura destacando el papel de la tecnología de microalgas en aplicaciones arquitectónicas, mapeando áreas de investigación interdisciplinarias y proporcionando direcciones estratégicas para futuras investigaciones.

## METODOLOGÍA

Dentro del alcance de este estudio se realizó una búsqueda bibliográfica sistemática y exhaustiva en la base de datos Web of Science (WoS) el 8 de mayo de 2025, con el objetivo de

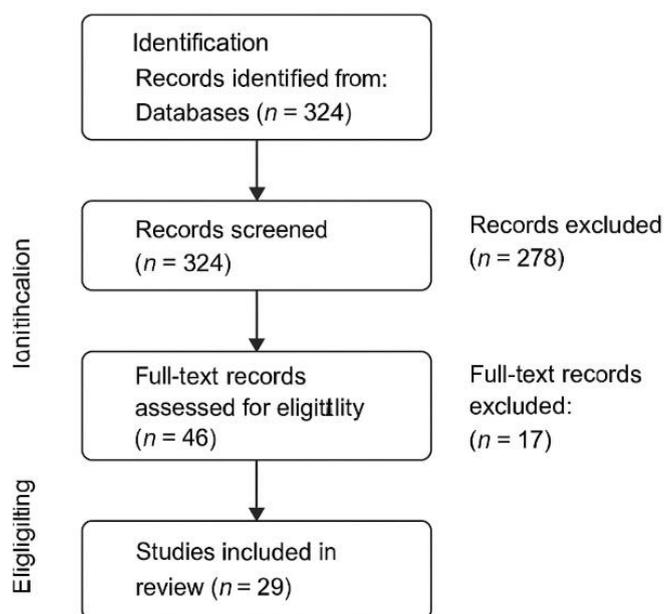


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA del estudio. Fuente: Preparado por los autores.

identificar publicaciones académicas relacionadas con la aplicación de algas en fachadas de edificios. La estrategia de búsqueda empleó una combinación de palabras clave basadas en el tema, para capturar estudios relevantes de diversos orígenes disciplinarios. Los datos bibliográficos recuperados fueron exportados y posteriormente analizados utilizando el paquete Bibliometrix R para realizar un análisis bibliométrico. Esto incluyó la evaluación de años de publicación, revistas, áreas temáticas, países, instituciones, patrones de autoría, colaboraciones internacionales y distribuciones de palabras clave.

En línea con los estándares internacionales actuales para revisiones sistemáticas, el estudio se realizó siguiendo las pautas PRISMA 2020 (Elementos de Reporte Preferidos para Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis). Todo el proceso de revisión, incluida la identificación, selección, evaluación de elegibilidad e inclusión final de los estudios, se documentó utilizando el diagrama de flujo y la pauta de cotejo PRISMA. El diagrama de flujo que resume el proceso de selección del estudio se presenta en la Figura 1, mientras que la pauta de cotejo PRISMA correspondiente se proporciona en los materiales complementarios.

La búsqueda en la base de datos de Web of Science se realizó utilizando palabras clave basada en el tema. El primer grupo de palabras clave incluyó: "microalgas" O "algas" O "fotobiorreactor" O "algas", lo que permitió filtrar la literatura relacionada con microalgas y sistemas fotobiorreactores. El segundo grupo se centró en fachadas de edificios e incluyó los términos: "fachada" O "Cerramientos de Edificios" O "envolvente de edificios" O "alzado de edificios" O "fachada" O "acristalamiento", identificando estudios relacionados con envolventes de edificios. Combinando estos dos grupos de palabras clave, se recuperaron 232 fuentes académicas. Estas

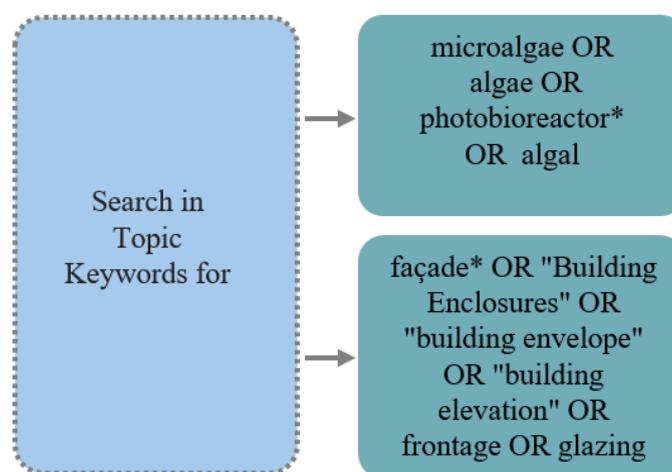


Figura 2. Búsqueda en la base de datos de Web of Science. Fuente: Preparado por los autores.

fuentes formaron el conjunto de datos para el análisis y se utilizaron en la evaluación bibliométrica de este estudio (Figura 2). Los estudios se incluyeron en función de criterios de elegibilidad predefinidos: (1) enfoque en aplicaciones de microalgas en fachadas de edificios, (2) artículos revisados por pares en inglés, (3) publicaciones entre 1986-2025. Los criterios de exclusión incluyeron revisiones que no se enfocaron en la integración arquitectónica o estudios que carecían de diseño experimental.

## RESULTADOS

La búsqueda realizada en la base de datos de Web of Science el 8 de mayo de 2025 identificó 232 estudios. Solo los artículos escritos en inglés fueron incluidos en el proceso de análisis bibliométrico.

En este contexto, este análisis bibliométrico, basado en 217 artículos en inglés publicados entre 1986 y 2025, revela que el área ha mostrado un crecimiento constante con una tasa de crecimiento anual del 5,48%, y se ha erigido como un campo académico altamente colaborativo. Con contribuciones de 743 autores, los documentos demuestran un promedio de 4,53 coautores por publicación y solo 11 artículos de un solo autor, lo que indica que la investigación en este campo se lleva a cabo predominantemente a través del trabajo en equipo. La tasa de coautoría internacional es del 23,5%, destacando la fuerte colaboración global dentro del campo. Los documentos tienen una antigüedad promedio de 7,88 años y han recibido cada uno un promedio de 17,35 citas, lo que refleja un impacto académico significativo. Un total de 795 palabras clave y 7.585 referencias indica la diversidad de contenido de la investigación y el amplio alcance de la literatura revisada (Figura 3).



Figura 3. Información principal de los estudios. Fuente: Preparado por los autores.

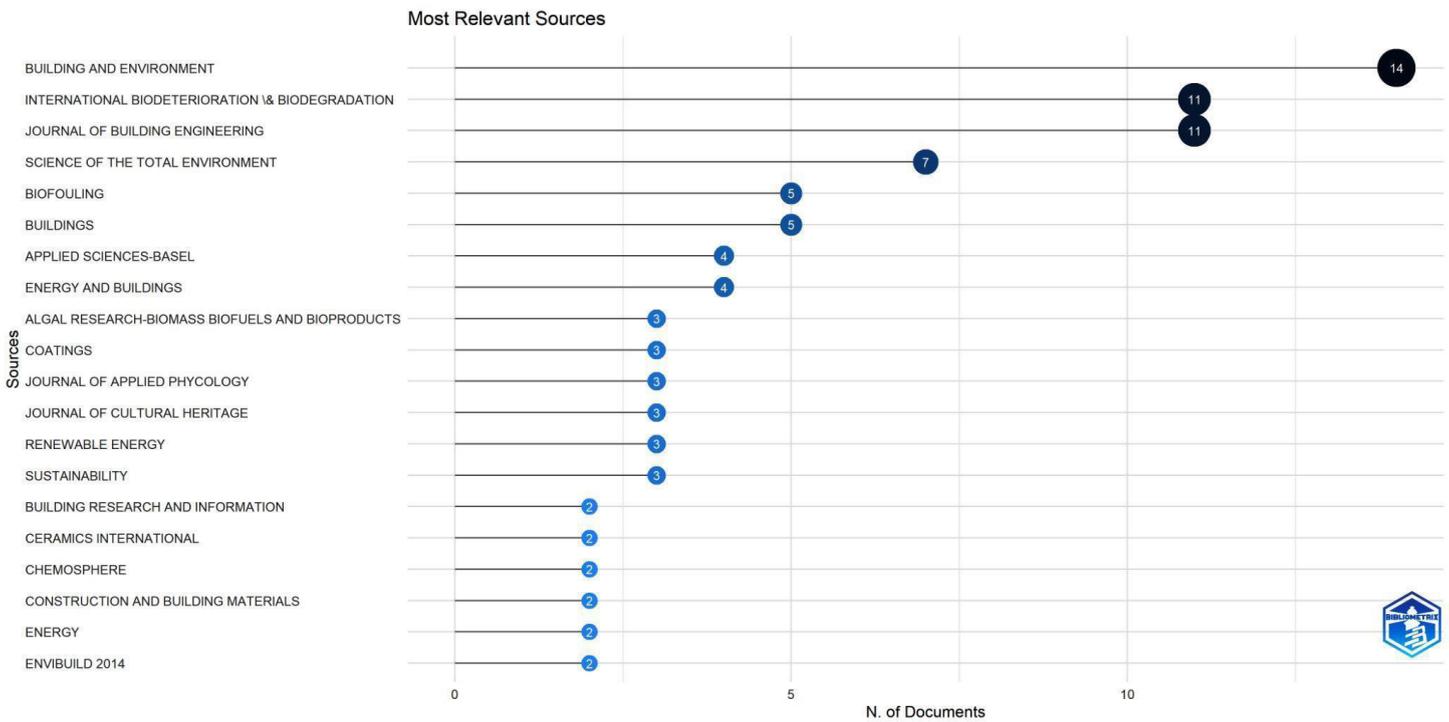


Figura 4. Fuentes más relevantes. Fuente: Preparado por los autores.

Los datos presentados en el gráfico de “Fuentes más relevantes” (Figura 4) demuestran claramente el carácter interdisciplinario de la investigación sobre la aplicación de algas en fachadas de edificios. Una de las revistas con mayor número de publicaciones, Building and Environment (14 documentos), presenta ocasionalmente estudios que evalúan el desempeño ambiental, la eficiencia energética y la sostenibilidad de los sistemas de fachadas integrados con algas. Aunque algunos estudios han explorado los sistemas de fachadas integrados por algas, estos siguen siendo relativamente limitados dentro del alcance más amplio de los trabajos publicados. Fuentes como International Biodeterioration & Biodegradation (11 documentos) y Biofouling (5 documentos) destacan el enfoque

significativo en los aspectos microbiológicos de las algas, incluidos sus efectos biológicos, procesos de degradación e interacciones con las superficies de los materiales. De forma similar, las publicaciones en revistas como Journal of Building Engineering, Energy and Buildings y Applied Sciences-Basel enfatizan las soluciones de ingeniería y las contribuciones de producción de energía de los sistemas de fachadas basados en algas. Además, la presencia de revistas especializadas como Algal Research, Journal of Applied Ficology y Renewable Energy indica que las algas también se están explorando debido a su potencial en la producción de energía renovable y aplicaciones biotecnológicas en el contexto de la integración de fachadas arquitectónicas. Esta distribución muestra

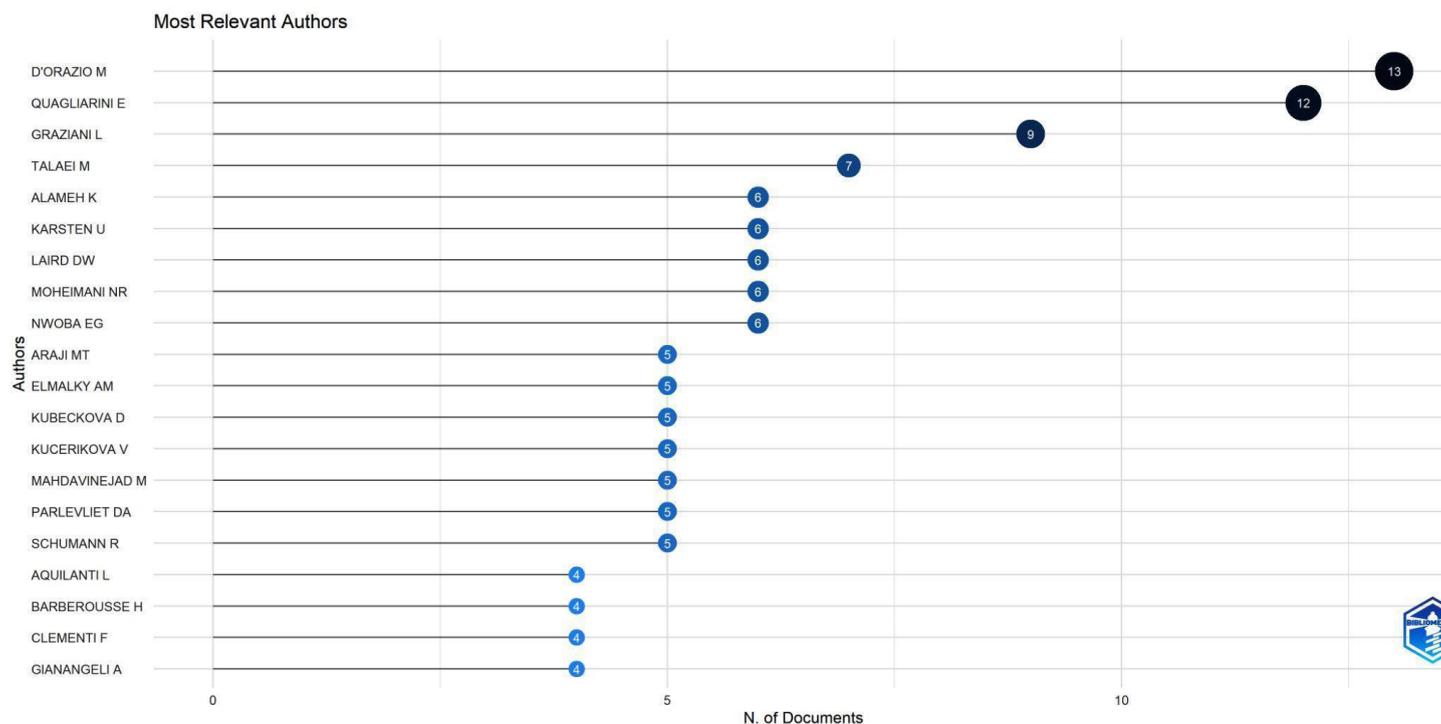


Figura 5. Autores más relevantes. Fuente: Preparado por los autores.

claramente que el tema se aborda no solo en el campo de la arquitectura, sino también en las ciencias ambientales, la biotecnología y la ingeniería energética, lo que refleja su panorama de investigación multidisciplinario.

Los datos del gráfico de los autores más relevantes (Figura 5) muestran a los autores más influyentes en el trabajo académico sobre el uso de algas en fachadas y revelan los perfiles de los investigadores en los que se centra la producción científica en este campo. D'Orazio, M. (13 documentos) y Quagliarini, E. (12 documentos) se encuentran entre los investigadores más destacados en el campo de los efectos biológicos de las algas en las superficies de los edificios, sus consecuencias sobre la resistencia de los materiales y la integración de estos organismos en los sistemas de fachadas. Graziani L. (9 documentos) y Talaei M. (7 documentos) también han producido estudios que exploran las posibilidades de los diseños de fachadas basados en algas en términos de desempeño ambiental y energético. Otros autores destacados, como Alameh K., Karsten U., Moheimani N. R. y Nwoba E. G., han contribuido en el contexto de la biología de las algas, la eficiencia fotosintética y los sistemas de fachadas biotecnológicas, aportando perspectivas de ciencias ambientales, ingeniería y biotecnología al tema.

El gráfico de afiliaciones más relevante (Figura 6) muestra la distribución de publicaciones académicas sobre el uso de microalgas en fachadas, por universidad. La Università Politecnica delle Marche (Italia) (32 artículos) y la Universidad de Murdoch (Australia) (31 artículos) destacan entre las instituciones con mayor número de publicaciones. Esto demuestra que estas universidades son centros de investigación punteros en enfoques biotecnológicos y arquitectónicos

sustentables, como el uso de microalgas en fachadas de edificios. Cabe destacar que la Universidade Nova de Lisboa (Portugal), la Universidad Tecnológica de Sydney (Australia) y la Universidad de Waterloo (Canadá) también contribuyen con 12-17 artículos. Los datos proporcionan una dirección importante para la colaboración académica y el intercambio de conocimientos para los investigadores interesados en integrar microalgas en las fachadas de los edificios.

El mapa de producción científica de los países (Figura 7) muestra la distribución geográfica de la producción científica sobre el uso de microalgas en aplicaciones frontales de edificios. Los países resaltados en azul oscuro en el mapa tienen la mayor producción académica en este campo. Alemania (90 publicaciones) es el claro líder en este campo, seguido de Francia (68), Australia (58) e Italia (53). Esto indica que los países europeos están asumiendo un papel de liderazgo en la integración de tecnologías de microalgas en sistemas fronterizos sostenibles y que la infraestructura de investigación en estos países es sólida. En particular, países como Alemania y Francia son pioneros en términos de investigación aplicada y colaboraciones entre la industria y la academia. En el mapa, la intensa producción académica de Australia muestra que destacan los estudios sobre sistemas de fachadas biotecnológicas que aprovechan las ventajas climáticas del continente. El hecho de que países como Irán, China y EE.UU. también tengan una capacidad de producción creciente en este campo muestra que las innovaciones basadas en microalgas se están generalizando a nivel mundial y que esta tecnología se integrará en geografías más amplias en el futuro.

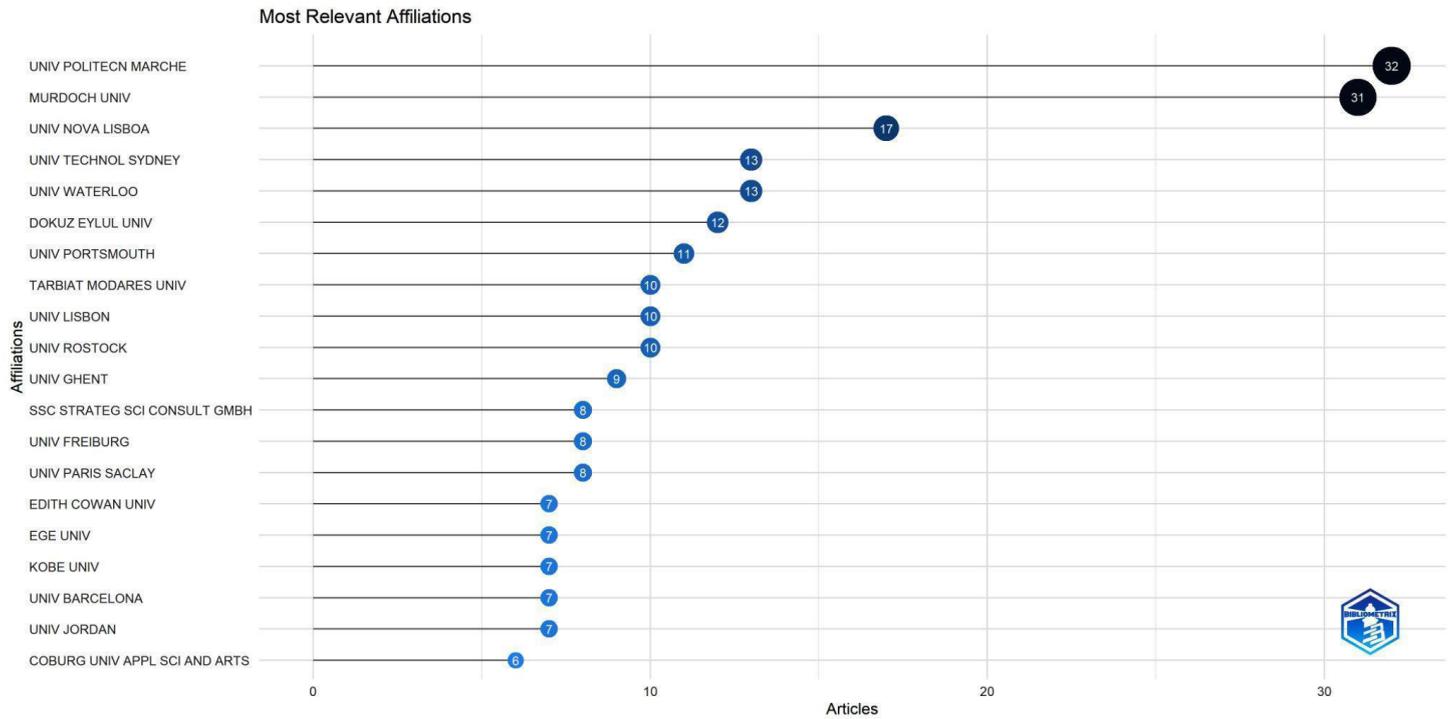


Figura 6. Afiliaciones más relevantes. Fuente: Preparado por los autores.

### Country Scientific Production

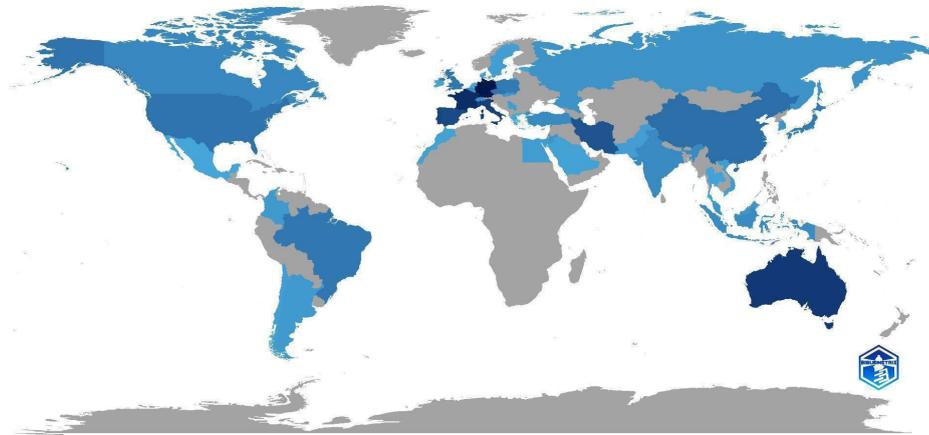


Figura 7. Producción científica de los países. Fuente: Preparado por los autores.

Las palabras clave en el gráfico (Figura 8) muestran los temas en torno a los cuales se ha examinado el uso de algas en las superficies de las fachadas en la literatura académica. Los términos más utilizados, "microalgas" (n = 32) y "algas" (n = 31), indican que el foco de estas investigaciones está en las especies de microalgas. Si bien términos como "biodeterioro" (n=10), "bioincrustación" (n=7) y " biorreceptividad "(n=6) reflejan una extensa investigación sobre la interacción de las algas con las superficies, los efectos biológicos en los materiales de la fachada y la idoneidad de las superficies para el crecimiento de algas, los términos "fotobiorreactor" (n=16) y "cianobacterias" (n=14) indican que el foco se ha puesto en la producción de estos organismos en sistemas controlados

y en la diversidad de especies. El interés académico en la durabilidad de las fachadas, sus características superficiales y su impacto en la colonización de algas se destaca aún más mediante palabras clave orientadas a los materiales de construcción, como "fachada" (n=7), "durabilidad" y "porosidad" (n=6). Estos resultados sugieren que las algas están siendo consideradas en los sistemas de fachadas desde perspectivas disciplinares que incorporan consideraciones ambientales y materiales.

Los temas en tendencia en el gráfico (Figura 9) ilustran la evolución del uso de algas en fachadas a lo largo del tiempo. En el período posterior a 2013, la creciente frecuencia de

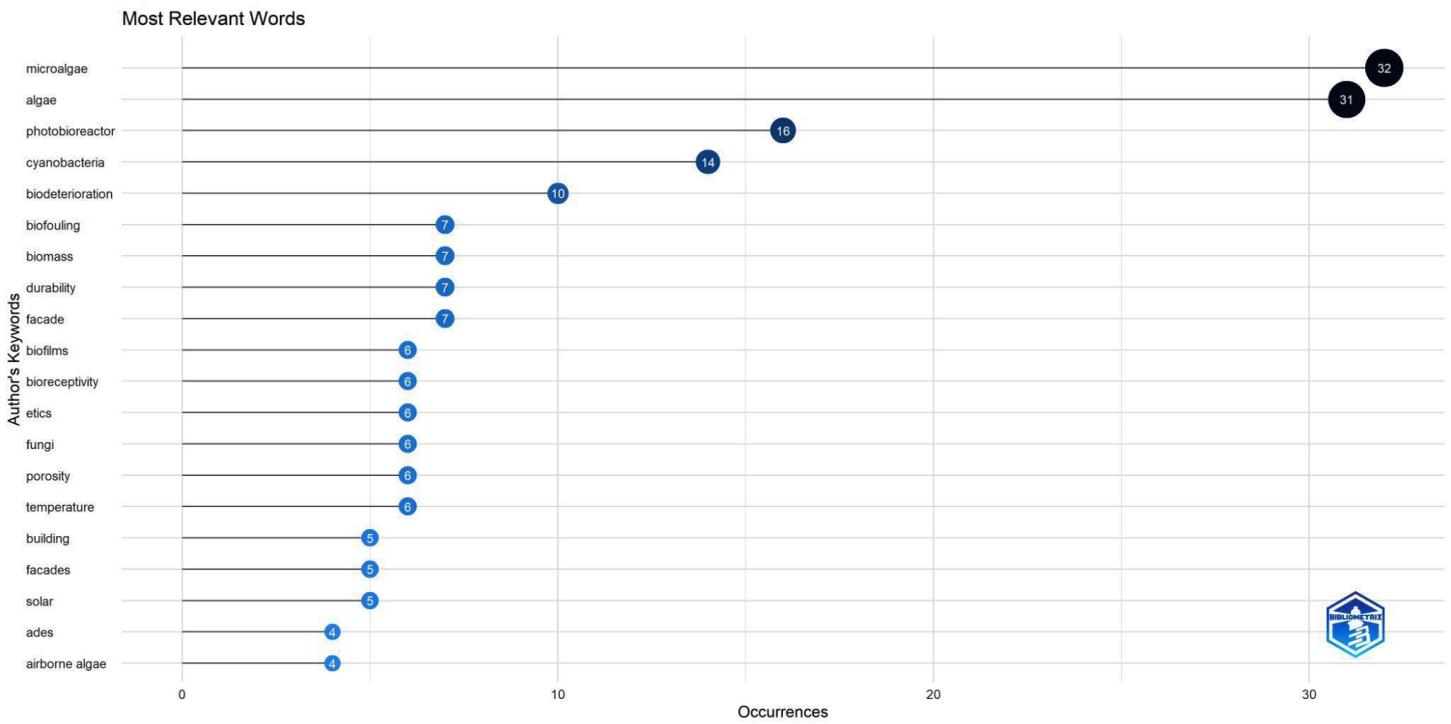


Figura 8. Palabras más frecuentes. Fuente: Preparado por los autores.

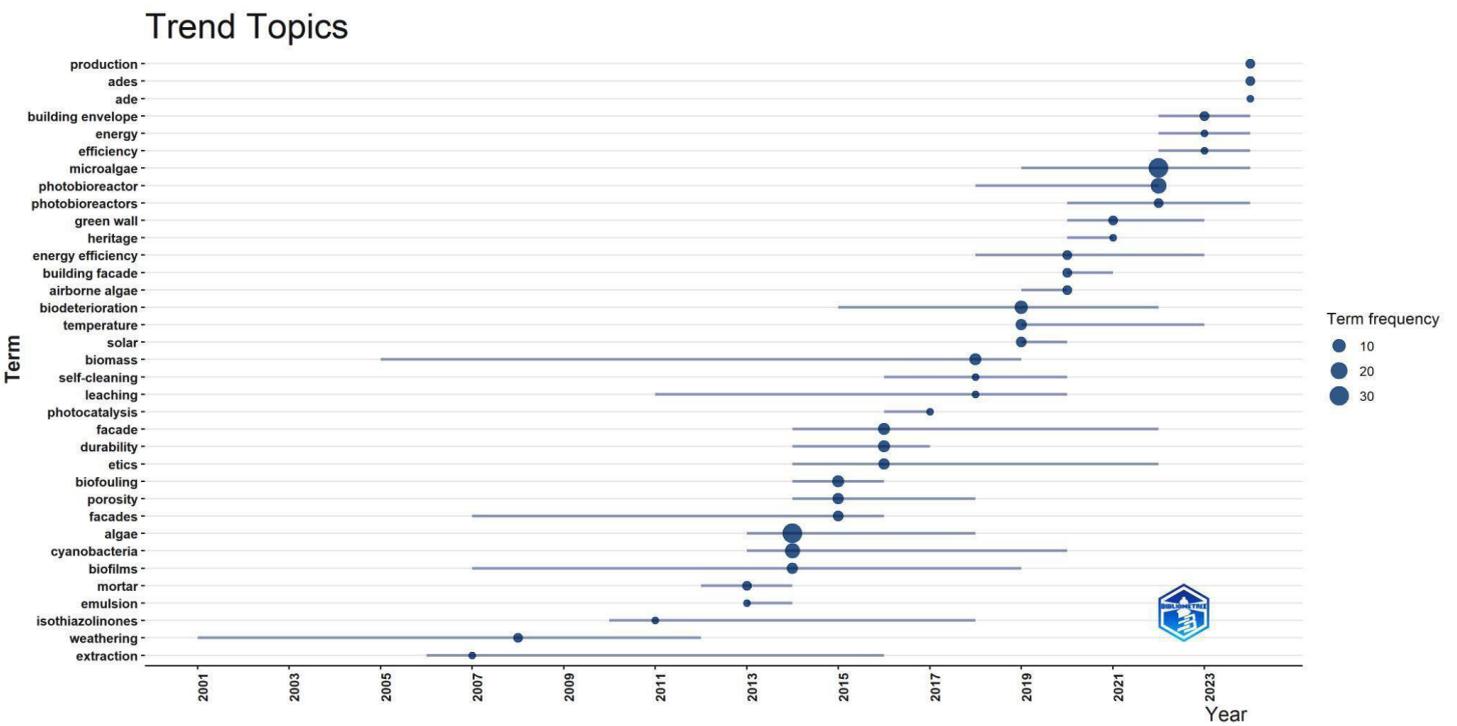


Figura 9. Temas en tendencia. Fuente: Preparado por los autores.

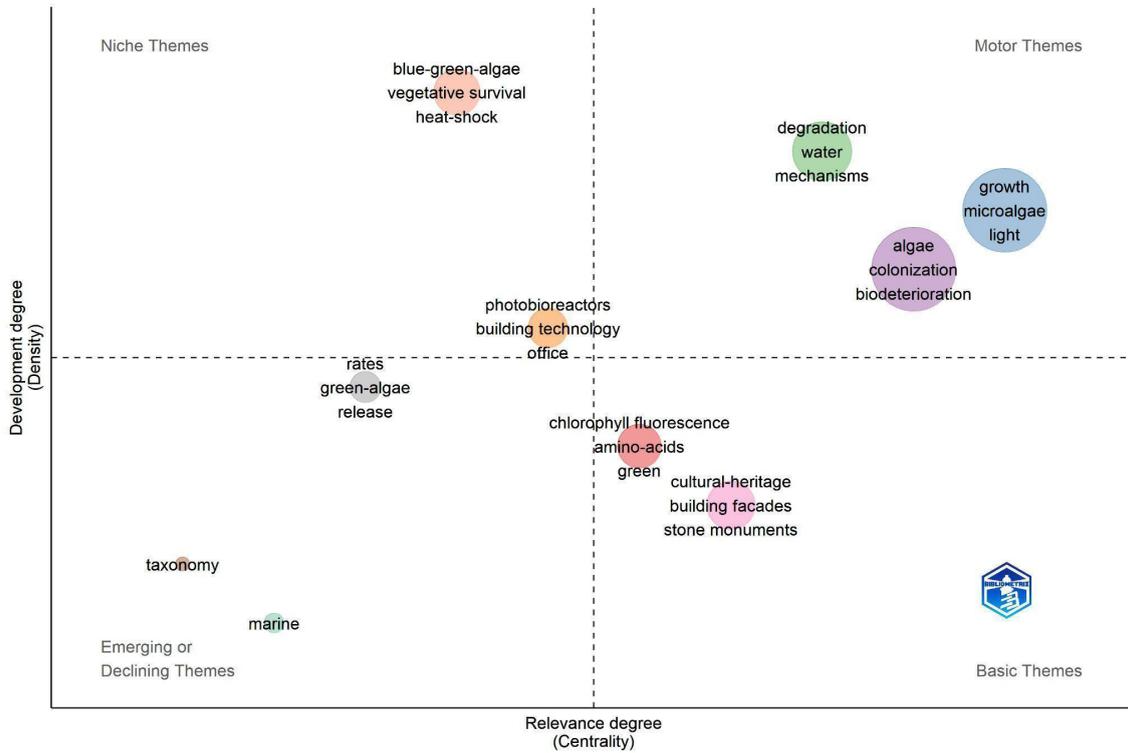


Figura 10. Mapa temático. Fuente: Preparado por los autores.

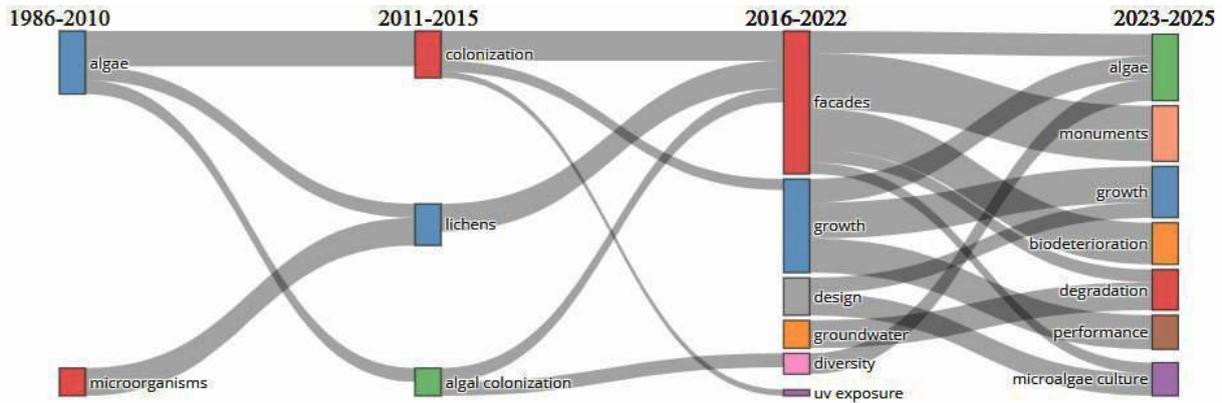


Figura 11. Evolución temática. Fuente: Preparado por los autores.

términos como “microalgas”, “fotobiorreactor” y “eficiencia energética” revela que este campo ha comenzado a atraer más atención en el contexto de la sustentabilidad y la producción de energía. En particular, el término “microalgas” se usó muy frecuentemente entre 2018 y 2023, lo que indica que estos organismos vivos se destacan por sus funciones, como la producción de biocombustibles y la absorción de carbono, en aplicaciones de fachadas. Además, términos como “envolvente del edificio”, “muro verde”, “durabilidad” y “autolimpieza” enfatizan que las algas pueden ofrecer contribuciones no solo biológicas, sino también estructurales y estéticas en los sistemas de fachadas. La distribución de términos a lo largo del eje temporal indica que este tema ha adquirido una dimensión interdisciplinaria y ahora se está

abordando de manera integrada, abarcando la eficiencia energética, la durabilidad de los materiales y las soluciones ambientales.

El enfoque contextual y el grado de desarrollo de la investigación académica sobre el uso de algas en fachadas se representan en el mapa temático de la Figura 10. En la esquina superior derecha, términos como “crecimiento”, “microalgas” y “luz” se destacan como “temas motores” con alta centralidad y densidad, lo que sugiere que estos temas están bien desarrollados y son esenciales para el área. De forma similar, los temas altamente centrales de “algas”, “colonización” y “biodeterioro” indican que el biodeterioro y la acumulación de algas en las superficies de

las fachadas se encuentran entre los temas de investigación principales. Mientras tanto, "taxonomía" y "marino", en la parte inferior izquierda, representan temas decrecientes o poco desarrollados con baja centralidad e intensidad y términos como "algas verdeazuladas" y "choque térmico", en la parte superior izquierda, representan temas de nicho de particular interés definidos más específicamente. Términos como "fachadas de edificios", "patrimonio cultural" y "monumentos de piedra" se encuentran en el área central inferior y exhiben una alta centralidad pero baja densidad, lo que indica que son temas fundamentales con un margen sustancial de expansión. A pesar de que la investigación sobre el uso de algas en fachadas ha avanzado en el contexto del crecimiento y la degradación biológicos, esta distribución sugiere que se requiere más investigación para las tecnologías de construcción y las aplicaciones en el patrimonio cultural.

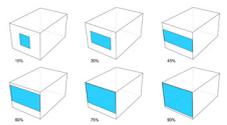
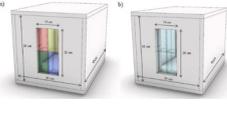
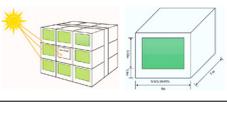
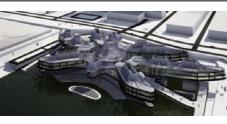
El diagrama de Sankey en la Figura 11 ilustra la evolución de las tendencias académicas en el uso de algas en fachadas a lo largo de los años. La investigación sobre términos biológicos generales, como "algas" y "microorganismos", fue más frecuente entre 1986 y 2010. Sin embargo, entre 2011 y 2015, el enfoque cambió al estudio de asentamientos biológicos en superficies de edificios, utilizando términos como "colonización", "líquenes" y "colonización de algas". La investigación ha experimentado cambios significativos entre 2016 y 2022, centrándose en temas más especializados como "fachadas", "crecimiento", "diseño", "diversidad" y "aguas subterráneas". Esto sugiere que la relación entre las algas y las envolventes de los edificios se está estudiando tanto en términos de crecimiento biológico como de

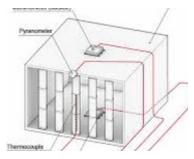
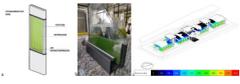
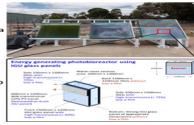
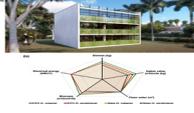
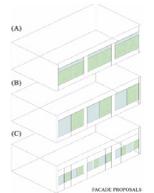
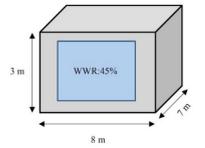
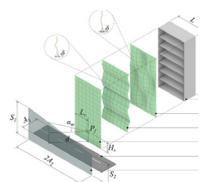
diseño. Con términos como "biodeterioro", "degradación", "rendimiento" y "cultivo de microalgas", que destacan la robustez y funcionalidad de los materiales de la fachada, así como los procesos de producción de microalgas, estos temas se han vuelto aún más complejos en el período más reciente, entre 2023 y 2025. Esta evolución demuestra cómo la aplicación de algas en fachadas se ha convertido en un campo de estudio multidisciplinario que ahora abarca el diseño sustentable, la ingeniería de materiales y la biología de superficies.

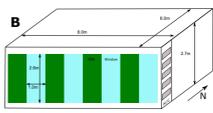
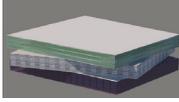
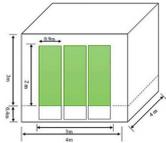
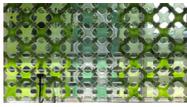
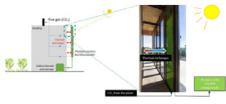
## REVISIÓN SISTEMÁTICA

Como parte del estudio, se utilizó una matriz comparativa para el diseño de fachadas de algas, ubicación, clima, tipo de fotobiorreactor, tipo de algas y uso previsto en la fachada para analizar el contenido de los artículos escaneados en WOS (Tabla 1). Se encontraron 26 publicaciones que crearon sugerencias de fachada para el uso de algas entre 217 estudios. Tras examinar estos artículos se reveló que las propuestas de fachada se crearon principalmente para los Estados Unidos, Europa (incluidos Alemania, España y Francia) e Irán. Se representaron diferentes zonas climáticas, donde se usaron algas *Chlorella vulgaris* como especies de algas, y los tipos de paneles planos se emplearon típicamente como tipos de fotobiorreactores. Según los estudios, los objetivos principales del uso de algas en fachadas son la eficiencia energética, el control de la luz natural, el confort estético y la producción de biomasa.

Tabla 1. Diseños con algas en fachadas. Fuente: Preparado por los autores.

Fuente	Imagen	Lugar	Clima	Tipo de fotobiorreactor	Especies de microalgas	Función de la fachada
Negev et al, 2019		Universidad de Tel Aviv, Israel	Clima mediterráneo	Fotobiorreactor de panel plano	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> versus <i>Chlorella vulgaris</i>	Eficiencia energética, control de sombra y luz natural, confort térmico, producción de biomasa
Sarmadi y Mahdaveinejad, 2023		Teherán, Irán	Clima semiárido frío	Fotobiorreactor de panel plano	<i>Chlorella vulgaris</i>	Confort visual, eficiencia energética, confort térmico, generación de energía
Ahmadi et al., 2023		Isfahán, Irán	Clima cálido y seco	Fotobiorreactor de panel plano	<i>Chaetoceros</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Haematococcus pluvialis</i> , <i>Spirulina platris</i>	Eficiencia energética, confort térmico, control de la luz natural, absorción de CO <sub>2</sub>
Talaei et al., 2021b		Meshed, Irán	Clima semiárido frío	Fotobiorreactor de panel plano	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> versus <i>Chlorella vulgaris</i>	Eficiencia energética, control de la luz natural, confort térmico, sombreado
Hasnan y Zaharin, 2020		Malasia	Clima tropical	Fotobiorreactor de panel plano	-	Eficiencia energética, confort térmico, control de la luz natural y sustentabilidad

Fuente	Imagen	Lugar	Clima	Tipo de fotobiorreactor	Especies de microalgas	Función de la fachada
Woo et al., 2022		-	-	Fotobiorreactor de panel plano	Chlorella sp.	Eficiencia energética, confort térmico, control de la luz natural, absorción de CO <sub>2</sub>
Rezazadeh et al., 2021		Teherán, Irán	Clima semiárido	Un fotobiorreactor de circuito cerrado	-	Mejora de la calidad del aire, eficiencia energética y diseño de edificios sustentables
Talaei et al., 2021		Passo Fundo, Brasil	Clima templado	Fotobiorreactor de panel plano		Eficiencia energética, confort térmico, control de la luz natural, absorción de CO <sub>2</sub>
Nwoba et al., 2021		Australia Occidental	Clima mediterráneo	Fotobiorreactor de panel plano	Nannochloropsis sp. (deniz mikroalg türü)	Producción de biomasa, generación de electricidad, eliminación de la necesidad de agua para refrigeración, eficiencia energética
Gol et al., 2025		-	-	Fotobiorreactor de sistema cerrado	Chlorella sorokiniana y Chlorella vulgaris	Generación de energía eléctrica, tratamiento de aguas residuales, producción de biodiesel, producción de bioproductos de alto valor (lípidos, luteína, clorofila a y b)
Elmalky y Araji, 2024a		España	Clima mediterráneo	Fotobiorreactor tubular	Chlorella vulgaris	Eficiencia energética, producción de biomasa, control solar, regulación de ganancias de calor, absorción de dióxido de carbono
Metwally e Ibrahim, 2024		Hamburgo, Alemania	Clima oceánico templado	Fotobiorreactor de panel plano	Chlorella vulgaris	Producción de energía, filtrado de luz solar, aislamiento térmico, aporte estético
Yaman et al., 2025		Europa Central	Clima continental	Fotobiorreactor de panel plano	Scenedesmus obliquus	Eficiencia energética, confort interior, minimización del impacto ambiental
Talaei y Sangin, 2024a		-	Clima mediterráneo	Fotobiorreactor tubular	Chlorella vulgaris	Regulación de la temperatura interior, la luz natural y reducción del consumo de energía.
Elmalky y Araji, 2024b		Estados Unidos	Clima templado	Fotobiorreactor de panel plano	Chlorella vulgaris	Producción de energía, control solar pasivo, reducción de la huella de carbono
Villalba et al., 2023		Sur de Europa	Clima templado	Fotobiorreactor de panel plano y sistemas cilíndricos	Chlorella vulgaris y Spirulina platensis	Mejora de la calidad del aire, absorción de dióxido de carbono, producción de biocombustibles, contribución estética y reducción del efecto isla de calor urbano.

Fuente	Imagen	Lugar	Clima	Tipo de fotobiorreactor	Especies de microalgas	Función de la fachada
Girard et al., 2023		Toulouse, Francia	Clima oceánico templado	Fotobiorreactor de panel plano	Chlorella vulgaris	Equilibrio de las ganancias de calor, regulación de la temperatura interior, absorción de CO <sub>2</sub> y control de la luz natural
Vajdi y Aslani, 2023		Arizona, Estados Unidos	Clima semiárido cálido	Panel plano horizontal	Nannochloropsis oculata	Producción de energía, control de la temperatura interior y gestión de la luz natural
Todisco et al., 2022		Milán, Italia	Clima subtropical húmedo	Panel plano vertical	Chlorella vulgaris	Filtración de la radiación solar, absorción de CO <sub>2</sub> y mejora del rendimiento energético del edificio.
Talaei et al., 2022		Seúl, Corea del Sur	Clima continental húmedo	Fotobiorreactor de panel plano	Chlorella vulgaris	Reducción del consumo de energía, optimización las temperaturas interiores, control de la luz natural y contribución a la sustentabilidad ambiental.
Wu et al., 2022		-	Clima mediterráneo	Panel modular	Chlorella vulgaris	Producción de energía, integridad estética, absorción exterior de CO <sub>2</sub> y aislamiento térmico
Scherer et al., 2020		Ilmenau, Alemania	Clima continental templado	Fotobiorreactor multicapa	Cianobacterias o clorofitas	Generación de energía, iluminación de la envolvente del edificio, luz natural, absorción de CO <sub>2</sub> y apariencia estética
Biloria y Thakkar, 2020		Hamburgo, Alemania	Clima oceánico templado	Fotobiorreactor de doble capa	Chlorella vulgaris	Filtración de la luz natural, aumento del confort térmico interior, aporte de energía a través de la producción de biomasa y reducción de las emisiones de CO <sub>2</sub>
Arbye et al., 2020		Indonesia	Clima tropical	Fotobiorreactor de panel plano	Chlorella sp.	Mejora de la calidad del aire, sombreado, generación de energía, confort térmico, estética visual y producción sostenible de biocombustibles.
Elrayies, 2018		-	-	Fotobiorreactor de panel plano y tubular	Chlorella vulgaris y Spirulina platensis	Generación de energía, reducción de emisiones de carbono, mejora del confort térmico interior, control de la luz natural y contribución estética
Pruvost et al., 2016		Barcelona, España	Clima mediterráneo	Fotobiorreactor de panel plano	Chlorella vulgaris	Contribución al equilibrio energético del edificio, creación de una fuente de energía renovable con producción de biomasa, aumento del confort térmico interior y control solar

La matriz comparativa revela patrones comunes en los diseños revisados. El uso predominante de *Chlorella vulgaris* y fotobiorreactores de panel plano en diferentes climas sugiere un modelo funcional y adaptable para la integración en fachadas. La mayoría de los estudios de casos enfatizan la eficiencia energética, el control de la luz natural y el confort térmico, lo que indica una tendencia hacia los sistemas de fachadas multifuncionales. A pesar de la diversidad en las ubicaciones geográficas, la recurrencia de tipos de microalgas y configuraciones de fotobiorreactores similares señala un consenso sobre la viabilidad técnica. Estos hallazgos destacan las oportunidades para estandarizar las tecnologías de algas integradas en fachadas y sugieren la necesidad de realizar más estudios sobre el rendimiento a largo plazo, la rentabilidad y la aceptación del usuario (Tabla 1).

## CONCLUSIÓN

Este estudio examinó la literatura sobre la aplicación de microalgas en fachadas de edificios utilizando técnicas bibliométricas basadas en artículos en inglés publicados en la base de datos Web of Science, entre 1986 y 2025. Según los resultados de 217 documentos, el tema ha atraído más atención recientemente y ha demostrado un avance académico constante, con una tasa de crecimiento anual del 5,48%. En particular, la tasa de crecimiento anual observada del 5,48% en publicaciones se alinea con tendencias más amplias en la publicación académica. Por ende, esta cifra debería interpretarse con cautela y no como un indicador directo de la prominencia relativa del tema. Además, la inclusión exclusiva de artículos en inglés puede haber limitado el alcance de la revisión, potencialmente pasando por alto investigaciones significativas publicadas en otros idiomas. Estas limitaciones introducen un grado de sesgo que debe reconocerse al interpretar los hallazgos.

Las contribuciones de los 743 autores en estos documentos demuestran cómo la investigación interdisciplinaria ha dado forma al área y cuán altamente colaborativa es. Los sistemas de fachadas basados en microalgas se han convertido en un campo de investigación integral que abarca no solo la arquitectura y las ciencias de la construcción, sino también muchas otras disciplinas, incluida la ingeniería ambiental, la biotecnología y los sistemas energéticos, como lo demuestra el hecho de que la mayoría de las publicaciones examinadas es de varios autores y que la tasa de colaboración internacional es del 23,5%. La media de 17,35 citas recibidas por los documentos indica que el tema tiene un alto nivel de impacto académico y que la investigación ha tenido una influencia importante en la comunidad científica.

Se confirma que los estudios sobre el uso de algas en fachadas se abordan tanto en términos de sustentabilidad como de interacción biológica mediante la inclusión de revistas de diversos campos, entre ellas "Building and Environment", "International Biodeterioration & Biodegradation" y "Biofouling", entre las revistas con mayor

número de publicaciones dentro del alcance del análisis. La contribución de las microalgas a la eficiencia energética a través de sistemas de fotobiorreactores también se destaca en publicaciones en revistas especializadas en energía, como "Algal Research" y "Renewable Energy".

El estudio también encontró que universidades como la Universidad de Murdoch en Australia y la Università Politecnica delle Marche en Italia son líderes en el área. Estos centros son clave para las colaboraciones internacionales tanto en términos de producción científica como de infraestructura de investigación, como lo demuestran sus altos números de publicaciones. Las sólidas redes de investigación que respaldan el potencial de las microalgas en aplicaciones de primera línea también se ven confirmadas por la gran cantidad de publicaciones y colaboraciones nacionales e internacionales en países como Alemania, Francia y Australia.

El mapa conceptual de la red y el análisis de palabras clave demuestran que hay dos ejes principales a lo largo de los cuales se aborda la aplicación de microalgas en las superficies de las fachadas: el primero es la investigación de prevención de daños, incluida la degradación basada en materiales, bioincrustaciones, biodeterioro y biorreceptividad; siendo el segundo las aplicaciones orientadas al beneficio, incluida la producción de energía, la sustentabilidad y los sistemas de fotobiorreactores. De acuerdo con esta estrategia integral, los sistemas de fachadas basados en microalgas serán cruciales para la eficiencia energética futura, el desempeño ambiental y las políticas de urbanización. En consecuencia, el uso de microalgas en fachadas de edificios se ha convertido en un área de estudio vibrante donde se están desarrollando nuevas soluciones que se adhieren a los principios de sustentabilidad, aumentan las colaboraciones interdisciplinarias y se expande la interacción global. Tanto la producción académica como las prácticas arquitectónicas aplicadas se beneficiarán significativamente del crecimiento futuro de este campo y su integración con otras disciplinas.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, A. T & G. M.-A.; Curación De datos, A. T & G. M.-A.; Análisis formal, A. T & G. M.-A.; Adquisición de financiación; Investigación, A. T & G. M.-A.; Metodología, A. T & G. M.-A.; Administración de proyecto, A. T & G. M.-A.; Recursos, A. T & G. M.-A.; Software, A. T & G. M.-A.; Supervisión, A. T & G. M.-A.; Validación, A. T & G. M.-A.; Visualización, A. T & G. M.-A.; Escritura - revisión y edición, A. T & G. M.-A.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores declaran que este estudio se realizó sin ningún apoyo financiero de organismos públicos, comerciales o sin fines de lucro.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmadi, F., Wilkinson, S., Rezazadeh, H., Keawsawasvong, S., Najafi, Q., & Masoumi, A. (2023). Energy efficient glazing: A comparison of microalgae photobioreactor and Iranian Orosi window designs. *Building and Environment*, 233, 109942. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109942>
- Arbye, S., Arianti, R. F., Pradana, Y. S., Suyono, E. A., Koerniawan, M. D., Suwanti, L. T., Siregar, U. J., & Budiman, A. (2020). The design of microalgae (*Chlorella* sp.) photobioreactor as a façade bus shelter building in Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 2296(1), 020007. <https://doi.org/10.1063/5.0030408>
- Arora, R., Sudhakar, K., & Rana, R. S. (2024). Photobioreactors for building integration: A overview of designs and architectural potential. *Heliyon*, 10(15), e35168. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35168>
- Bloria, N., & Thakkar, Y. (2020). Integrating algae building technology in the built environment: A cost and benefit perspective. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), 370-384. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.004>
- Bitog, J. P., Lee, I. B., Lee, C. G., Kim, K. S., Hwang, H. S., Hong, S. W., Seo, I.-H., Kwon, K.-S. & Mostafa, E. (2011). Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactors for microalgae production: a review. *Computers and electronics in agriculture*, 76(2), 131-147. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.015>
- Carvalho, J. C. M., Matsudo, M. C., Bezerra, R. P., Ferreira-Camargo, L. S., & Sato, S. (2014). Microalgae Bioreactors. In R. Bajpai, A. Prokop & M. Zappi (Eds.). *Algal Biorefineries: Volume 1: Cultivation of Cells and Products* (pp. 83-126). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7494-0>
- Elmalky, A. M., & Araj, M. T. (2024a). Kinetics model with experimental validation for optimal microalgae generation in double-skin façades. *Energy*, 311, 133335. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133335>
- Elmalky, A. M., & Araj, M. T. (2024b). Optimization models for photosynthetic bioenergy generation in building façades. *Renewable Energy*, 228, 120607. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120607>
- Elrayies, G. M. (2018). Microalgae: Prospects for greener future buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(1), 1175-1191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.032>
- Gao, C., Xin, H., Yang, S., Li, Z., Liu, S., Xu, B., Zhang, T., Dutta, S., & Tang, Y. (2022). Trends and performances of the algal biofuel: a bibliometric approach. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 30(2), 284-300. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2022.16746>
- Girard, F., Toublanc, C., Andres, Y., Dechandol, E., & Pruvost, J. (2023). System modeling of the thermal behavior of a building equipped with facade-integrated photobioreactors: Validation and comparative analysis. *Energy and Buildings*, 292, 113147. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113147>
- Gol, N., Taghavijeloudar, M., Jalilian, N., & Rezanian, S. (2025). Microalgae cultivation in semi-transparent photovoltaic bioreactor for sustainable power generation, wastewater treatment and biodiesel production. *Energy Conversion and Management*, 325, 119417. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119417>
- Hasnan, M. T. I. M. T., & Zaharin, P. M. B. (2020). Exploration of microalgae photobioreactor (PBR) in tropical climate building envelope. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 5(14), 263-278. <https://doi.org/10.21834/ebpj.v5i14.2166>
- Huang, Q., Jiang, F., Wang, L., & Yang, C. (2017). Design of photobioreactors for mass cultivation of photosynthetic organisms. *Engineering*, 3(3), 318-329. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.020>
- Kinawy, R. N., Fathy, W., Hammouda, O., Abdelhameed, M. S., Sayed, A. F., & Shaban, A. M. (2024). Revealing the utilization of microalgae in cosmetics: insights from a comprehensive scientometric analysis over the last two decades. *International Aquatic Research*, 16(4), 375-397. <http://doi.org/10.22034/iar.2024.2008952.1753>
- Li, Z., & Zhu, L. (2021). The scientometric analysis of the research on microalgae-based wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 25339-25348. <http://doi.org/10.1007/s11356-021-12348-4>
- Melo, J. M., Ribeiro, M. R., Telles, T. S., Amaral, H. F., & Andrade, D. S. (2022). Microalgae cultivation in wastewater from agricultural industries to benefit next generation of bioremediation: a bibliometric analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(15), 22708-22720. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17427-0>
- Metwally, W. M., & Ibrahim, V. A. R. (2024). The Integration of Bio-Active Elements into Building Façades as a Sustainable Concept. *Buildings*, 14(10), 3086. <https://doi.org/10.3390/buildings14103086>
- Negev, E., Yezioro, A., Polikovskiy, M., Kribus, A., Cory, J., Shashua-Bar, L., & Golberg, A. (2019). Algae Window for reducing energy consumption of building structures in the Mediterranean city of Tel-Aviv, Israel. *Energy and Buildings*, 204, 109460. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109460>
- Nwoba, E. G., Parlevliet, D. A., Laird, D. W., Alameh, K., & Moheimani, N. R. (2020). Pilot-scale self-cooling microalgal closed photobioreactor for biomass production and electricity generation. *Algal Research*, 45, 101731. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101731>
- Öncel, S. Ş., Köse, A., & Öncel, D. Ş. (2016). 11 - Façade integrated photobioreactors for building energy efficiency. *Start-Up Creation, The Smart Eco-Efficient Built Environment*, 237-299. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100546-0.00011-X>
- PRISMA. (2020). PRISMA 2020. <https://www.prisma-statement.org/>

- Pruvost, J., Le Gouic, B., Lepine, O., Legrand, J., & Le Borgne, F. (2016). Microalgae culture in building-integrated photobioreactors: Biomass production modelling and energetic analysis. *Chemical Engineering Journal*, 284, 850-861. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.118>
- Purba, L. D. A., Susanti, H., Admirasari, R., Praharyawan, S., & Iwamoto, K. (2024). Bibliometric insights into microalgae cultivation in wastewater: Trends and future prospects for biolipid production and environmental sustainability. *Journal of Environmental Management*, 352, 120104. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120104>
- Rezazadeh, H., Kordjamshidi, M., Ahmadi, F., & Eskandarinejad, A. (2021). Use of double-glazed window as a photobioreactor for CO<sub>2</sub> removal from air. *Environmental Engineering Research*, 26(2), 200122. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.122>
- Rumin, J., Nicolau, E., Gonçalves de Oliveira Junior, R., Fuentes-Grünwald, C., Flynn, K. J., & Picot, L. (2020). A bibliometric analysis of microalgae research in the world, Europe, and the European Atlantic area. *Marine Drugs*, 18(2), 79. <https://doi.org/10.3390/md18020079>
- Sarmadi, H., & Mahdavinejad, M. (2023). A designerly approach to Algae-based large open office curtain wall Façades to integrated visual comfort and daylight efficiency. *Solar Energy*, 251, 350-365. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.021>
- Scherer, K., Stiefelmaier, J., Strieth, D., Wahl, M., & Ulber, R. (2020). Development of a lightweight multi-skin sheet photobioreactor for future cultivation of phototrophic biofilms on facades. *Journal of Biotechnology*, 320, 28-35. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.06.004>
- Sedighi, M., Pourmoghaddam Qhazvini, P., & Amidpour, M. (2023). Algae-powered buildings: A review of an innovative, sustainable approach in the built environment. *Sustainability*, 15(4), 3729. <https://doi.org/10.3390/su15043729>
- Silva, S. C., Ferreira, I. C., Dias, M. M., & Barreiro, M. F. (2020). Microalgae-derived pigments: A 10-year bibliometric review and industry and market trend analysis. *Molecules*, 25(15), 3406. <http://doi.org/10.3390/molecules25153406>
- Singh, S. P., & Singh, P. (2015). Effect of temperature and light on the growth of algae species: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 50, 431-444. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.024>
- Talaei, M., & Prieto, A. (2024a). A review on performance of sustainable microalgae photobioreactor façades technology: exploring challenges and advantages. *Architectural Science Review*, 67(5), 387-414. <https://doi.org/10.1080/00038628.2024.2305889>
- Talaei, M., Mahdavinejad, M., Azari, R., Prieto, A., & Sangin, H. (2021). Multi-objective optimization of building-integrated microalgae photobioreactors for energy and daylighting performance. *Journal of Building Engineering*, 42, 102832. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102832>
- Talaei, M., & Sangin, H. (2024b). Thermal comfort, daylight, and energy performance of envelope-integrated algae-based bioshading and static shading systems through multi-objective optimization. *Journal of Building Engineering*, 90, 109435. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109435>
- Talaei, M., Mahdavinejad, M., Azari, R., Haghighi, H. M., & Atashdast, A. (2022). Thermal and energy performance of a user-responsive microalgae bioreactive façade for climate adaptability. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 101894. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101894>
- Todisco, E., Louveau, J., Thobie, C., Dechandol, E., Hervé, L., Durécu, S., Titica, M., & Pruvost, J. (2022). A dynamic model for temperature prediction in a façade-integrated photobioreactor. *Chemical Engineering Research and Design*, 181, 371-383. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.03.017>
- Ugwu, C. U., Aoyagi, H., & Uchiyama, H. (2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource technology*, 99(10), 4021-4028. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.046>
- Umdu, E. S. & Univ, Y. (2020). 12- Building Integrated Photobioreactor. *Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819481-2.00012-x>
- Vajdi, S., & Aslani, A. (2023). Design and techno-economic analysis of direct CO<sub>2</sub> capturing with integrated photobioreactors as a building façade. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103068. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103068>
- Villalba, M. R., Cervera, R., & Sánchez, J. (2023). Green solutions for urban sustainability: photobioreactors for algae cultivation on façades and artificial trees. *Buildings*, 13(6), 1541. <https://doi.org/10.3390/buildings13061541>
- Wang, B., Lan, C. Q., & Horsman, M. (2012). Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology advances*, 30(4), 904-912. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.01.019>
- Woo, D.-O., Lee, D., & Lee, S. (2022). Parametric design study of a proposed photobioreactor-integrated vertical louver system for energy-efficient buildings. *Journal of Green Building*, 17(3), 33-61. <https://doi.org/10.3992/jgb.17.3.33>
- Wu, C., Herbst, G., Lujan, A., & Kim, K. H. (2022, July). A Stochastic Approach To Simulate And Optimize The Coating Uniformity Of Rotational Molding For Microalgae Facades. In *2022 Annual Modeling and Simulation Conference (ANNSIM)* (pp. 569-580). IEEE. <http://doi.org/10.23919/ANNSIM55834.2022.9859444>
- Yaman, Y., Tokuç, A., Deniz, İ., Ezan, M. A., Köktürk, G., Dalay, M. C., & Demirel, Z. (2024). Photobioreactor facade panels: enhancing comfort, reducing energy use, and capturing carbon in temperate continental climates. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*, 5, 357-370. <https://doi.org/10.1007/s43393-024-00300-9>

Yılmaz, H. K. (2006). Mikroalg Üretimi İçin Fotobiyoreaktör Tasarımları. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 23(2), 327-332. <http://www.egejfas.org/tr/download/article-file/57730>

Yoo, J. J., Choi, S. P., Kim, J. Y., Chang, W. S., & Sim, S. J. (2013). Development of thin-film photo-bioreactor and its application to outdoor culture of microalgae. *Bioprocess and biosystems engineering*, 36(6), 729-736. <http://doi.org/10.1007/s00449-013-0898-2>



Teatro Regional del Bío Bío  
Rovío, Mchano y Cortiño  
2018



UNIVERSIDAD 2025

Objeto singular Concepción