

Aislamiento térmico como estrategia de mejora del confort en viviendas de zonas frías a gran altitud

Thermal Insulation as a Strategy to Improve Comfort in Homes in Cold Areas at High Altitude

Sandra Flores Asencio ¹ , Purificación González Martínez ² , Germán Ramos Ruiz ³ 

¹ Universidad de Navarra, Pamplona-Navarra, España, sflores@unap.edu.pe.

² Universidad de Navarra, Pamplona-Navarra, España, pgmarti@unav.es.

³ Universidad de Navarra, Pamplona-Navarra, España, gramrui@unav.es.

Cómo citar

S. Flores Asencio, P. González Martínez, and G. Ramos Ruiz Díaz, "Aislamiento térmico como estrategia de mejora del confort en viviendas de zonas frías a gran altitud", *Ingeniería: ciencia, tecnología e innovación*, vol. 12, 2025.

<https://doi.org/10.26495/5da2t427>

Información del artículo

Recibido: 06/05/2025

Aceptado: 28/07/2025

Publicado: 09/11/2025

Autor correspondencia

Sandra Flores Asencio

sflores@unap.edu.pe

RESUMEN: Esta investigación **evaluó** la mejora del confort térmico en una vivienda ubicada en una zona fría mediante la implementación de una envolvente térmica con aislamiento, considerando su viabilidad económica y su impacto a lo largo de la vida útil del edificio. Se adopta una **metodología** cuantitativa de tipo exploratorio, utilizando la técnica del estudio de caso. La muestra es no probabilística por conveniencia. El estudio se desarrolló durante cuatro meses, en temporada de verano, y consta de cuatro fases: análisis normativo, evaluación del estado actual, implementación de un prototipo de envolvente con aislamiento térmico y análisis mediante monitorización. Para ello, se emplearon registradores de datos que miden las fluctuaciones de temperatura y humedad relativa en dos habitaciones comparables: una intervenida y otra de control. Los **resultados** mostraron un incremento promedio de 2°C en la temperatura interior y una reducción del 10% en la humedad relativa en la habitación intervenida, permitiendo cumplir con la norma EM110, cuyas condiciones mínimas actuales no garantizan el confort térmico interior. Esta evidencia sugiere la necesidad de readjustar los criterios de envolvente térmica en dicha normativa. En conjunto la experiencia demuestra el impacto positivo de las estrategias pasivas en la mejora del confort térmico en viviendas existentes, proponiendo un enfoque replicable y de bajo costo que puede ser considerado en futuras actualizaciones normativas en el país.

Palabras clave: Arquitectura bioclimática, calidad ambiental, construcción de viviendas, normas de construcción, temperatura.

Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la Licencia Creative Commons Attribution (CC BY)



ABSTRACT: This research **evaluates** the improvement of thermal comfort in a home located in a cold area through the implementation of a thermal envelope with insulation, considering its economic viability and its impact throughout the building's useful life. An exploratory quantitative **methodology** was adopted, using the case study technique. The sample is non-probabilistic for convenience. The study is carried out over four months, during the summer season, and consists of four phases: regulatory analysis, assessment of the current state, implementation of a prototype thermal envelope and analysis through monitoring. For this purpose, data loggers are used to measure temperature and relative humidity fluctuations in two comparable rooms: one that has been modified and one that serves as a control. The **results** showed an average increase of 2°C in the interior temperature and a 10% reduction in relative humidity in the intervened room, allowing compliance with the EM110 standard, whose current minimum conditions do not guarantee indoor thermal comfort. This evidence suggests the need to readjust the thermal envelope criteria in this standard. Overall, the experience demonstrates the positive impact of passive strategies in the improving thermal comfort in existing homes, proposing a replicable and low-cost approach that can be considered for future regulatory updates in the country.

Keywords: Bioclimatic architecture environmental quality, housing construction, building standards, temperature.

1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética en la edificación es uno de los pilares fundamentales para garantizar condiciones adecuadas de habitabilidad, confort y sostenibilidad ambiental, especialmente en contextos climáticos extremos. En América Latina, la mayoría de los países carece de normativas específicas y exigibles que regulen el diseño térmico de las viviendas, lo que conlleva a construcciones ineficientes y una alta exposición al confort térmico [1]. Esta problemática se agudiza en regiones de alta montaña, como el altiplano peruano, donde la incidencia de temperaturas extremadamente bajas es persistente y afecta directamente a la salud y al bienestar de la población.

En el contexto peruano, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS) ha introducido la normativa EM.110 “Confort térmico y lumínico con eficiencia energética” [2], posteriormente reformulada como “Envolvente térmica” [3], con el objetivo de promover criterios técnicos para edificaciones térmicamente eficientes. No obstante, la aplicación efectiva de esta normativa en la vivienda continúa siendo limitada, tanto por restricciones económicas como por la falta de integración de criterios térmicos en el diseño arquitectónico convencional.

Diversas investigaciones [4], [5] en el país han evidenciado el impacto positivo de incorporar aislamiento térmico en muros, techos y ventanas, demostrando que reducir la transmitancia térmica mediante el uso de materiales no convencionales mejora considerablemente el comportamiento térmico de los espacios habitables. Varios estudios [6], [7] han propuesto soluciones pasivas basadas en técnicas constructivas locales y materiales de bajo costo, con resultados favorables obtenidos mediante simulaciones dinámicas. Asimismo, otras investigaciones [8], [9], han validado el uso de envolventes bioclimáticas en viviendas experimentales ubicadas en Puno, destacando su capacidad para alcanzar niveles aceptables de confort térmico incluso en condiciones de gran altitud. Por su parte [10] destacan que los sistemas de simulación energética de edificios permiten analizar tanto la calidad ambiental como la demanda energética de las construcciones. En esta línea [11] presentan una evaluación energética-económica que considera los materiales constructivos predominantes en la ciudad objeto de estudio. De igual forma [12] compararon diferentes configuraciones de materiales considerando variables como la orientación y el sombreado. En [13] sugieren que, para mejorar el confort térmico en urbanizaciones, se debe reducir la incidencia solar directa en climas cálidos y, por el contrario, favorecerla en zonas de clima frío. Finalmente [14] realizaron una evaluación energética de viviendas durante el periodo 1960–2011, logrando definir un modelo termo físico a partir de simulaciones dinámicas.

Desde el enfoque del confort adaptativo, teorías como la de Fanger [15] sirven de referencia para evaluar el bienestar térmico percibido por los usuarios, considerando no solo parámetros físicos, sino también condiciones subjetivas, culturales y de ocupación. En zonas altoandinas, estudios [16] han resaltado la sensibilidad específica de los habitantes a las corrientes de aire y a los cambios bruscos de temperatura, con un rango de confort ligeramente distinto al de otras latitudes.

En este marco, el presente estudio tuvo como propósito analizar el efecto de la implementación de una envolvente térmica con aislamiento en una vivienda ubicada en una zona fría de alta montaña, con el fin de aportar evidencia empírica sobre su viabilidad técnica y económica. El trabajo se enmarca en una perspectiva de mejora de la vivienda mediante estrategias pasivas, proponiendo alternativas replicables que puedan ser consideradas en futuras actualizaciones normativas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del caso de estudio

El caso de estudio se ubica en la ciudad de Puno, Perú, a 3827 m s. n. m., correspondiente a la Zona Bioclimática 6 – Continental muy frío según el Reglamento Nacional de Edificaciones. El clima local presenta temperaturas medias de 8.5 °C, con mínimas de -5 °C y máximas de 17 °C durante el verano; la precipitación anual promedio es de 800 mm, con vientos predominantes del noroeste y alta radiación solar diurna.

La vivienda seleccionada, construida en 1986, posee cuatro niveles, muros de ladrillo artesanal, tarrajeo de cemento y ventanas de vidrio simple sin aislamiento. La elección del inmueble respondió a criterios de accesibilidad, representatividad del parque habitacional urbano y disposición de los ocupantes para participar en el estudio. Se analizaron dos habitaciones comparables: una intervenida térmicamente y otra de control, ambas con iguales dimensiones y orientación.



Figura 1. Estado exterior de la vivienda antes de la intervención. Fuente: elaboración propia.

2.2 Fase de diagnóstico

Durante esta fase se realizó una evaluación integral del comportamiento térmico inicial de la vivienda, con el propósito de identificar las principales deficiencias en su envolvente. Se aplicaron técnicas de termografía infrarroja, monitorización ambiental y simulación energética, permitiendo establecer una línea base precisa de las condiciones térmicas antes de la intervención y orientar las decisiones constructivas posteriores.

2.2.1 Fase 1. Termografía

Se utilizó una cámara termográfica FLIR i50 (precisión $\pm 2\%$; sensibilidad térmica 0.1°C), calibrada según las condiciones ambientales locales. Las mediciones se realizaron durante la temporada de verano, entre las 08:00 y 10:00 h, con temperatura exterior promedio de 15°C y humedad relativa de 60 %. Las imágenes infrarrojas se capturaron desde el interior y exterior de la vivienda para identificar puentes térmicos, zonas de pérdida de calor y diferencias de transmitancia superficial.

2.2.2 Fase 2. Monitorización inicial

Se implementó un sistema de registradores de datos MadgeTech RHTemp101A, con un rango de medición de -40°C a $+80^\circ\text{C}$ y precisión de $\pm 0.3^\circ\text{C}$ para temperatura y $\pm 3\%$ para humedad relativa.

Se instalaron cinco sensores en cada habitación: muro medianero, alfeizar de ventana, muro interior, piso y techo. La frecuencia de registro fue de 5 minutos durante 30 días consecutivos, garantizando un total de más de 8000 registros por sensor. Previamente se verificó la calibración mediante contraste térmico en cámara climática.

La selección de puntos respondió a criterios de representatividad del gradiente térmico vertical y exposición a flujos de aire, con el fin de estimar la estabilidad térmica interior antes de la intervención.

2.2.3 Fase 3. Simulación energética

El comportamiento térmico inicial fue analizado con el software DesignBuilder v7.3.1.003, basado en el motor de cálculo EnergyPlus 9.4.0. Se emplearon datos climáticos locales (EPW) generados a partir de registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

El modelo consideró una ocupación promedio de 3 personas, ganancias internas de 3 W/m^2 , una tasa de ventilación natural de 0.5 renovaciones/hora y las propiedades térmicas de los materiales existentes: ladrillo artesanal ($\lambda = 0.69 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), mortero de cemento ($\lambda = 1.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) y vidrio simple de 6 mm ($\lambda = 1.05 \text{ W/m}\cdot\text{K}$).

Se calcularon las transmitancias térmicas (U) para muros, techos y pisos, comparándolas con los límites establecidos en la norma EM.110.

2.3 Fases de estudio

La investigación se realizó durante cuatro meses, en temporada de verano, y se estructuró en cuatro fases metodológicas, según el modelo de investigación propuesto por [9]:

2.3.1 Fase 1. Síntesis

Primero se realizó la revisión normativa [3], [15] para identificar los criterios establecidos y su aplicabilidad en zonas frías de alta montaña, la revisión técnica del marco teórico de confort térmico y análisis cualitativo de la vivienda.

2.3.2 Fase 2. Contraste

En la segunda fase se diagnosticó el estado actual de la vivienda mediante observación directa, levantamiento de datos arquitectónicos y térmicos a través de inspección termográfica. Simulación energética en DesignBuilder v7.3.1.003.

2.3.3 Fase 3. Exploratoria

Luego se implementó un prototipo de envolvente con aislamiento térmico utilizando materiales accesibles y técnicas constructivas adaptadas al contexto local: sistema compuesto por muro trasdosado con aislamiento, cielo raso con EPS, piso flotante HDF con aislamiento de 0.5 cm, recubrimiento exterior y cambio de ventanas de sistema moduglass a doble vidrio con cámara de aire.

2.3.4 Fase 4. Conclusiva

Finalmente se efectuó un análisis comparativo mediante la monitorización del comportamiento térmico con sensores MadgeTech RHTemp101A para registrar temperatura y humedad relativa durante tres condiciones: (1) sin aislamiento, (2) aislamiento parcial y (3) aislamiento completo.

En la Figura 2 se observa el estado interior del estudio de caso antes de la intervención donde la materialidad de los muros es de ladrillo artesanal, tarajeo de cemento y las ventanas son de sistema moduglass con vidrio simple de espesor de 6 mm.



a)



b)

Figura 2. Estado interior del estudio de caso. a) habitación a intervenir con aislamiento térmico, b) habitación de control. Fuente: elaboración propia.

2.4 Instrumentos y materiales

Los instrumentos utilizados fueron:

Una Cámara termográfica FLIR i50, con precisión de $\pm 2\%$ y sensibilidad térmica de 0.1°C como se presenta en la Figura 3.



Figura 3. Cámara termográfica Flir I60. Fuente: elaboración propia.

Sensores MadgeTech RHTemp101A, con un rango de medición de -40°C a $+80^{\circ}\text{C}$ con precisión de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ temperatura y $\pm 3\%$ de humedad relativa como se observa en la Figura 4.



Figura 4. Sensor Data Logger Madgetech. Fuente: elaboración propia.

Software DesignBuilder, para simulación energética y análisis del desempeño térmico. Y Python Jupyter en Google Colab, utilizado para el procesamiento de datos.

2.5 Fase de intervención (rehabilitación térmica)

La intervención consistió en la instalación de una envolvente térmica interior, diseñada con materiales de bajo costo y fácil implementación.

- Muros: sistema trasdosado interior tipo drywall, compuesto por placa de yeso, aislamiento térmico de lana de vidrio (40 mm, $\lambda = 0.036 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), barrera de vapor de polietileno y cámara de aire de 20 mm.
- Techo: incorporación de paneles de poliestireno expandido (EPS, 25 mm) bajo el cielo raso de yeso.
- Piso: instalación de piso flotante HDF (8.3 mm) con capa inferior de espuma aislante de 5 mm ($\lambda = 0.042 \text{ W/m}\cdot\text{K}$).
- Ventanas: reemplazo del sistema moduglass por vidrio doble de 6 mm con cámara de aire de 12 mm, sin rotura de puente térmico.

El costo total de la intervención fue de S/ 9000.00, equivalente a una inversión media-baja según los niveles socioeconómicos peruanos, lo cual demuestra la viabilidad económica de la propuesta.

2.6 Fase de monitorización post-intervención

Tras la rehabilitación, se repitió el protocolo de medición con los mismos sensores y condiciones de calibración. La duración de la campaña fue de 45 días, abarcando los meses de febrero y marzo de 2025, con temperaturas exteriores entre 18°C (máx.) y 3°C (mín.).

Los registros se realizaron con la misma frecuencia (5 min), asegurando comparabilidad estadística. Las mediciones incluyeron temperatura del aire, humedad relativa, diferencias entre superficies internas y externas, y variabilidad horaria, permitiendo analizar la respuesta térmica diaria y nocturna.

2.7 Análisis de datos

Los datos obtenidos fueron procesados mediante Python (bibliotecas Pandas y Matplotlib). Se aplicaron análisis descriptivos (media, rango, desviación estándar) y comparativos entre las condiciones pre y post intervención.

Para las simulaciones, se evaluaron las diferencias entre las temperaturas operativas interiores y los límites de confort definidos por el modelo PMV-PPD de Fanger, y se calcularon las transmitancias térmicas (U) de acuerdo con la norma ISO 6946.

Se consideró que el confort térmico se alcanzaba cuando la temperatura interior permanecía en el rango de 18–22 °C con humedad relativa inferior al 65 %, conforme a la norma EM.110.

3. RESULTADOS

Durante la etapa de contraste, se evaluó el estado térmico inicial mediante inspección termográfica y simulación energética con el software DesignBuilder. A continuación, se detallan los hallazgos más relevantes:

La imagen termográfica evidencia diferencias térmicas significativas entre marcos de ventanas, muros y encuentros constructivos, lo que sugiere la presencia de puentes térmicos críticos. Las temperaturas superficiales oscilan entre 14 °C y 22 °C. Las zonas frías, representadas en tonos violetas y azules (aproximadamente 14 °C), corresponden a superficies con alta pérdida térmica, como vidrios simples y muros sin aislamiento. En contraste, las zonas más cálidas, mostradas en tonos naranjas, rojos y amarillos (hasta 22 °C), indican acumulación de calor en superficies expuestas a radiación solar o con alta inercia térmica. El cursor central registra temperaturas de 19.8 °C y 20.5 °C. Estas imágenes permiten identificar deficiencias en el sistema envolvente, especialmente en las ventanas y uniones entre muros y elementos estructurales, donde la falta de aislamiento facilita la transferencia térmica no deseada, afectando la estabilidad térmica interior. Este análisis es clave para establecer la línea base del comportamiento térmico previo a la intervención pasiva.

La Figura 5 evidencia diferencias térmicas significativas entre marcos, muros y uniones constructivas, destacando puentes térmicos y zonas con alta pérdida de calor.

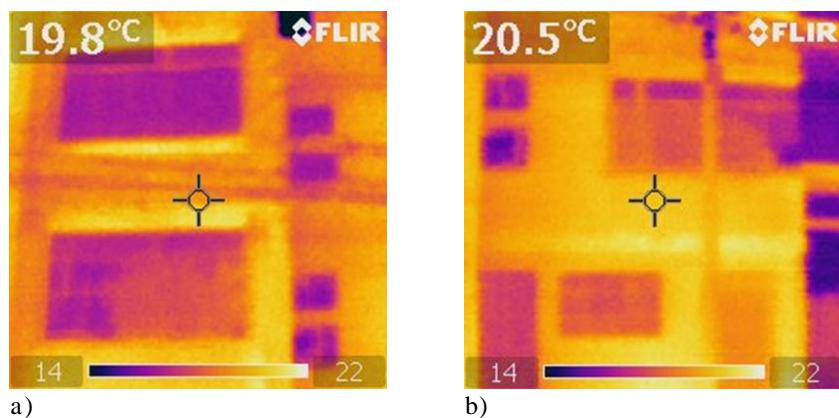


Figura 5. Análisis termográfico de pérdidas térmicas. a) Habitación a rehabilitar. b) Habitación de control sin intervención. Fuente: elaboración propia.

La Figura 6 muestra la representación digital de la vivienda modelada en DesignBuilder, utilizada para analizar el comportamiento térmico inicial mediante simulación energética.

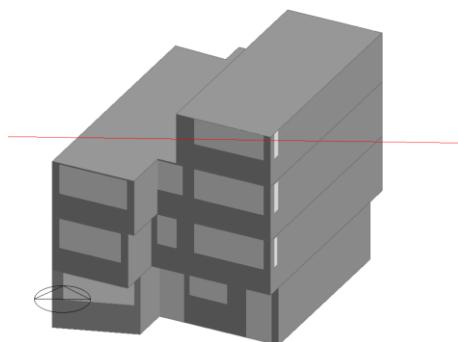


Figura 6. Modelo de Simulación energética en Design Builder. Fuente: elaboración propia.

Durante el mismo periodo de análisis, el modelo energético en DesignBuilder evidenció pérdidas de calor a través de muros, techos y suelos, especialmente durante la noche cuando la temperatura exterior disminuye. Se detectó confort por frío, con temperaturas operativas descendiendo hasta los 16 °C, lo cual resulta insuficiente para garantizar confort térmico, especialmente en condiciones de reposo o vestimenta ligera. A esta altitud, la sensibilidad al frío es mayor. A pesar de que las temperaturas interiores se mantienen entre 16 °C y 18 °C, según los criterios de Fanger, estas condiciones no alcanzan los niveles de confort aceptables.

La simulación mostró una transmitancia térmica en muros de 2.96 W/m²·K y en piso de 1.26 W/m²·K. La norma EM.110 establece valores máximos de 2.7 W/m²·K para muros, 1.20 W/m²·K para pisos y en techo de 0.8 W/m²·K en la zona 6 (clima continental muy frío), así como un rango aceptable de confort interior desde los 18 °C, umbral que no siempre se alcanza según los resultados de la simulación y la monitorización. Tras la intervención pasiva, los valores de transmitancia térmica mejoraron significativamente: muros con 0.44 W/m²·K, techo con 0.64 W/m²·K y piso con 0.78 W/m²·K, reflejando una mejora sustancial en la envolvente térmica y, por ende, en el confort interior, como se observa en la Figura 7.

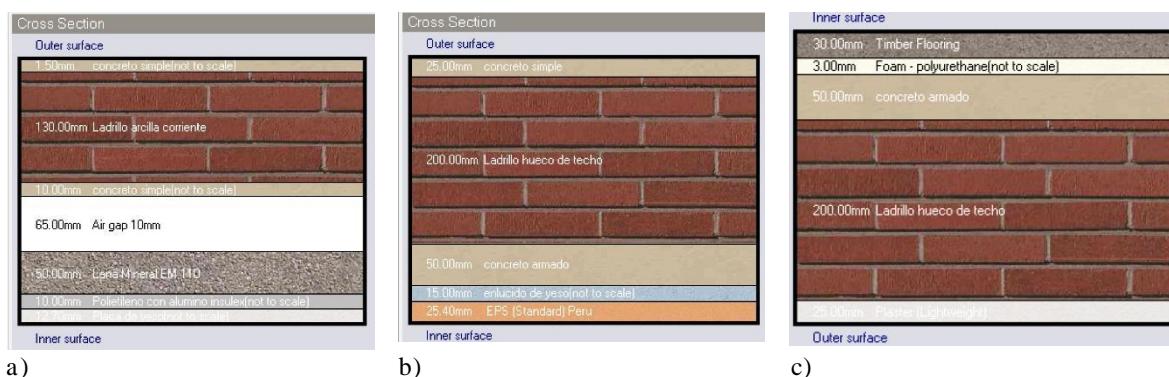


Figura 7. Envolvente térmica. a) Muro. b) techo. c) piso. Fuente: elaboración propia.

En la etapa conclusiva, se realizó la monitorización del comportamiento térmico mediante sensores MadgeTech RHTemp101A. En la condición (1) sin aislamiento, registrada en diciembre de 2024, las temperaturas exteriores oscilaron entre 20 °C (máxima) y -2 °C (mínima).

Las temperaturas interiores de la habitación de control fluctuaron entre 17 °C y 10 °C, mientras que la humedad relativa varió entre 70 % y 30 %. El canal 2, ubicado en el alfeizar interior de la ventana de la fachada principal, presentó la mayor variabilidad térmica, lo cual indica una zona menos protegida o con mayor exposición al entorno, como se observa en la Figura 08.

En la habitación a rehabilitar, las temperaturas interiores en promedio oscilaron entre 22 °C y 10 °C, con humedad relativa entre 70 % y 20 %, como se observa en la Figura 9. También en esta habitación, el canal 2 evidenció mayor variabilidad térmica, por su ubicación crítica

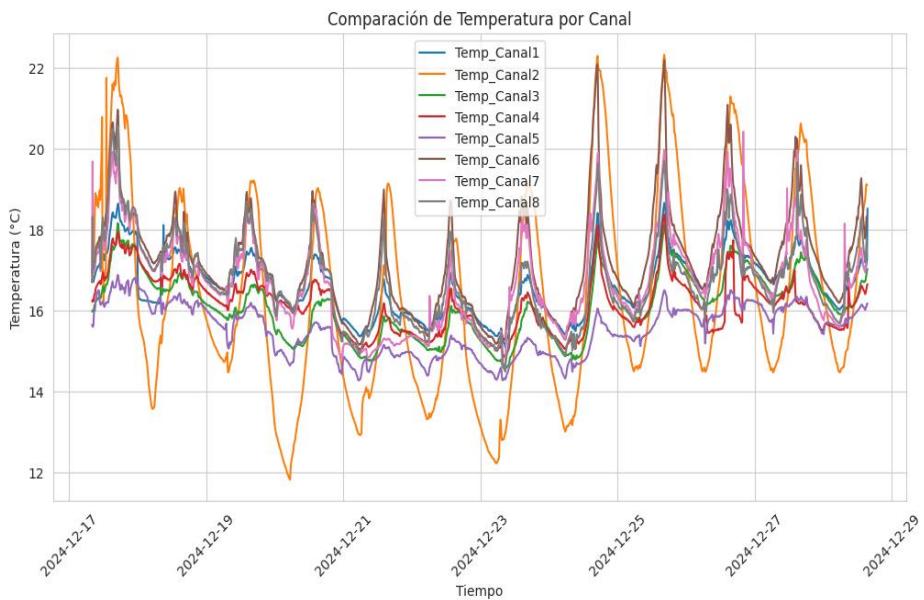


Figura 8. Comparación de temperatura por canal – Dormitorio 03 (habitación de control).
Fuente: elaboración propia.

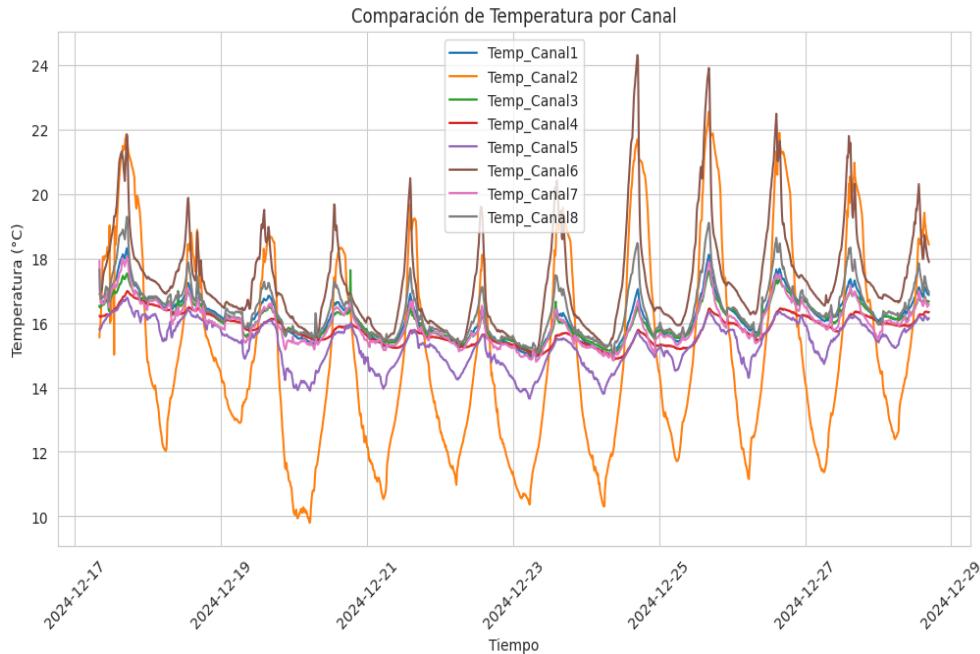


Figura 9. Comparación de temperatura por canal – Dormitorio 02 (habitación a ser rehabilitada).
Fuente: elaboración propia.

Se observó una leve tendencia a la baja en la temperatura hacia el final del periodo, posiblemente debido a un cambio estacional o climático, a pesar de tratarse de la temporada de verano. Las ondas térmicas de ambas habitaciones presentan comportamientos divergentes. Además, se identificaron discrepancias entre los resultados de la simulación y los datos obtenidos mediante monitorización.

Durante la etapa exploratoria se implementó una envolvente térmica compuesta por: muro trasdosado con aislamiento, cielo raso con EPS, piso flotante HDF con aislamiento, recubrimiento exterior y reemplazo de ventanas (de sistema moduglass a doble vidrio sin rotura de puente térmico) como se observa en la Figura 10.

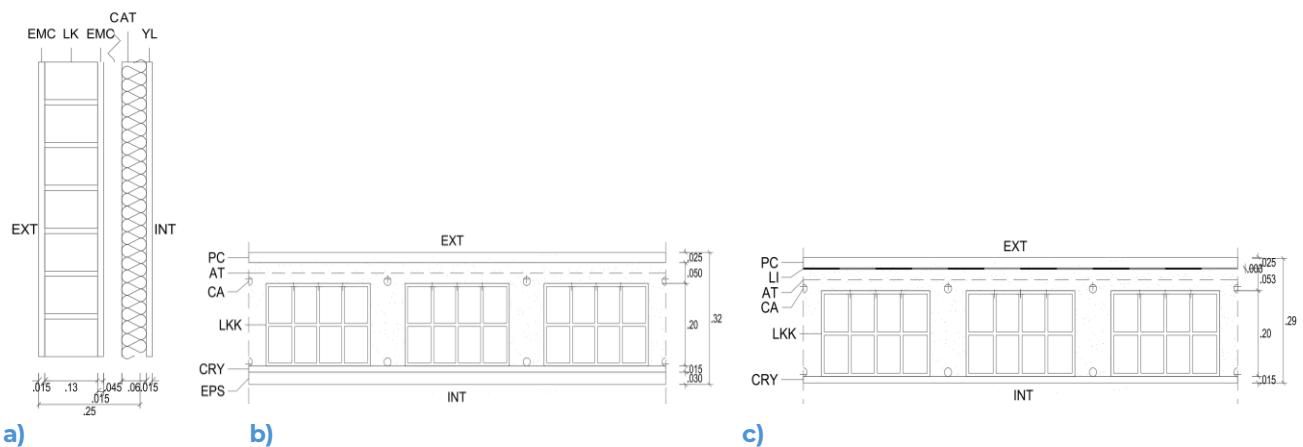


Figura 10. Detalle constructivo envolvente térmica. a) Muro trasdosado interior donde: INT=interior, YL= placa de yeso, AT= aislamiento térmico lana de vidrio con para vapor, C=cámara de aire, EMC=enlucido mortero cemento, EXT= exterior. b) Techo donde: EXT= exterior, PC=piso flotante, AT= Aislamiento térmico, CA= Concreto armado, LKK=Ladrillo King Kong para techo, CRY=cielo raso de yeso, EPS=Poliestireno expandido. c) Piso donde: EXT= exterior, PC=piso flotante, Li= espuma de poliestireno, AT= Aislamiento térmico, CA= Concreto armado, LKK=Ladrillo King Kong para techo, CRY=cielo raso de yeso.

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 11 se observa la implementación de la envolvente térmica en muros exteriores a través del tarrajeo de cemento.



Figura 11. Implementación de la envolvente térmica en muros exteriores.
 Fuente: elaboración propia.

En la Figura 12 se observa la habitación dormitorio 02 rehabilitada con la envolvente térmica en piso, muro y techo.



a) b)

Figura 12. Implementación de la envolvente térmica en piso, muros interiores y techo. a) Muros interiores con trasdosado de sistema drywall conformado por EPS, lana de vidrio, barrera de vapor y placa de yeso. b) Piso con espuma aislante y piso laminado HDF (8.3 mm, 19.3x1.20 cm); cambio de ventana a sistema de aluminio con vidrio doble (6 mm) con cámara de aire sin rotura de puente térmico; techo con cielo raso de EPS (1"). Fuente: elaboración propia.

El monto total de la implementación de la envolvente térmica asciende en S/. 9000.00 como se observa en la Tabla 1, el ingreso económico promedio mensual en el Perú según Ipsos [17] comprende entre S/ 12000 para la condición socioeconómica A y S/1300 para la condición socioeconómica E, entonces el costo total supondría menos de un sueldo para la clase A y casi 7 sueldos para la clase E.

Tabla 1. Costo envolvente térmica para rehabilitación interior.

Envolvente térmica	Área en M ²	Costo parcial en S/.
Muro interior	22.00	1528.00
Muro exterior habitación de control y habitación aislada	43.26	1200.00
Piso	15.24	600.00
Techo	16.00	160.50
Ventana habitación de control y habitación aislada	8.60	2000.00
Pintura en interiores habitación aislada		300.00
Mano de obra instalación y otros gastos de transporte		3211.50
Costo Total S/.		9000.00

Fuente: elaboración propia.

En la condición (3) con aislamiento completo, se colocaron sensores en diversos puntos de la envolvente para evaluar su desempeño térmico.

En la Figura 13 se muestra la ubicación de los canales: canal 1 en muro medianero con vecino, canal 2 en alfeizar de ventana fachada principal, canal 3 muro medianero con dormitorio 03, canal 4 en piso nivel 02, canal 5 en techo. Habitación de control sin aislamiento térmico: canal 1 en muro medianero con dormitorio 03, canal 2 en alfeizar de ventana fachada principal, canal 3 en muro medianero con vecino, canal 4 en piso nivel 02, canal 5 en techo.

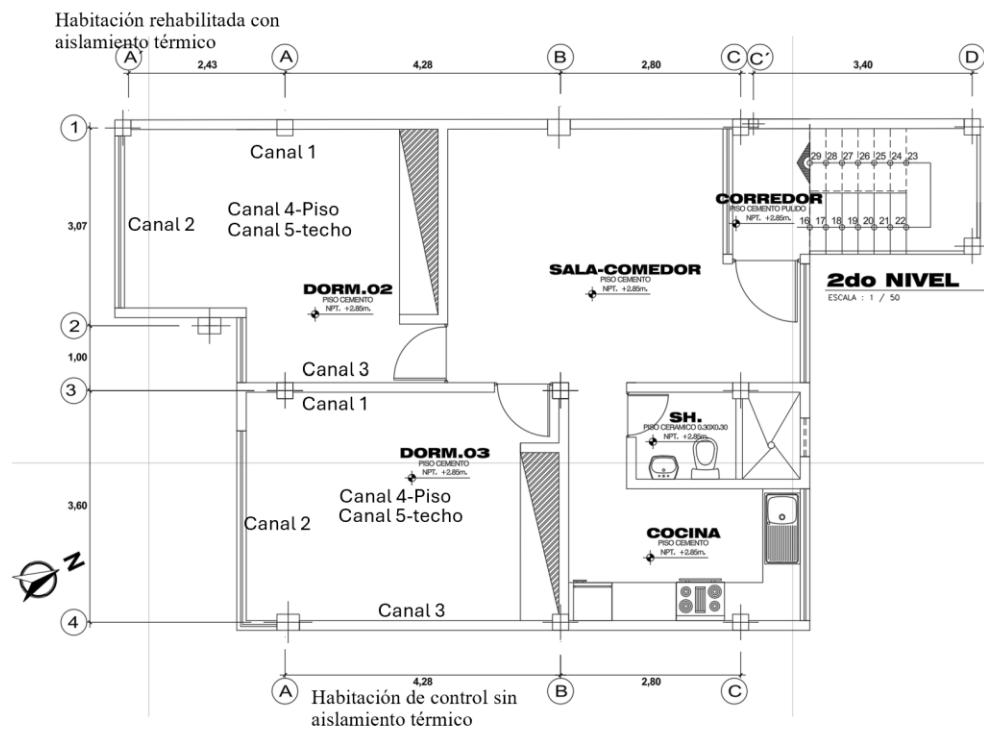


Figura 13. Planta de la vivienda – ubicación de los sensores (canales). Fuente: elaboración propia.

En el mes de febrero y marzo de 2025 las temperaturas exteriores oscilaron entre 18 °C (máxima) y 3°C (mínima). Las temperaturas interiores de la habitación de control fluctuaron entre 17 °C y 11°C, mientras que la humedad relativa varió entre 75 % y 55 %. El canal 2, ubicado en el alfeizar interior de la ventana de la fachada principal, presentó la mayor variabilidad térmica, lo cual indica una zona menos protegida o con mayor exposición al entorno, como se observa en la Figura 14.

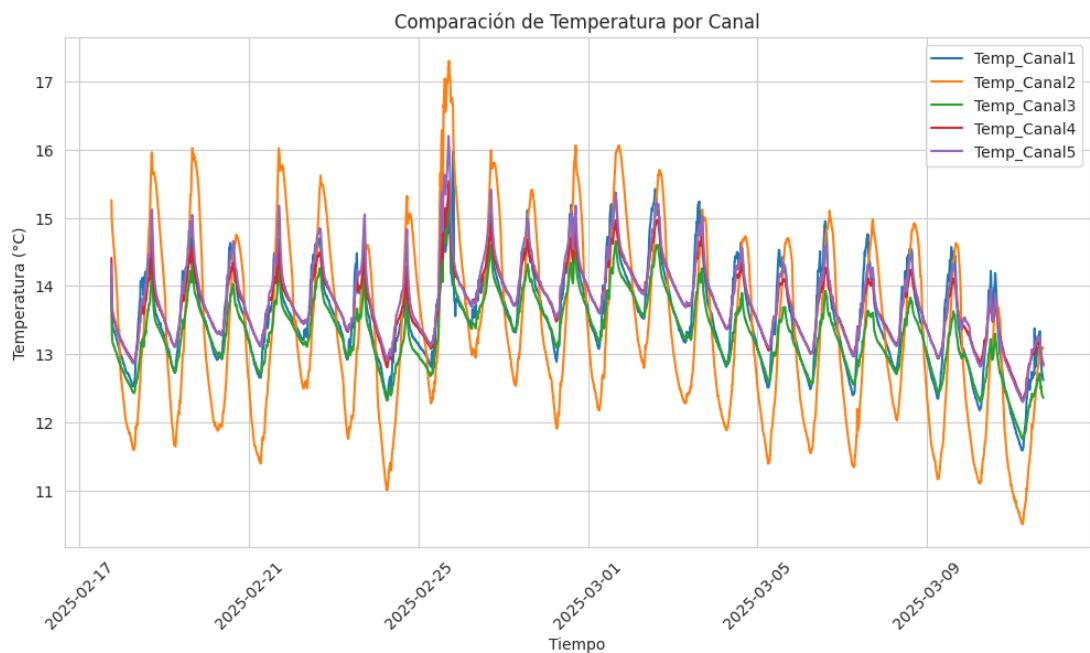


Figura 14. Comparación de temperatura por canal – Dormitorio 03. Fuente: elaboración propia.

En la habitación rehabilitada con envolvente térmica interior, las temperaturas interiores oscilaron entre 20 °C y 12 °C, con humedad relativa entre 70 % y 45 %. También en esta habitación, el canal 2

evidenció mayor variabilidad térmica, por su ubicación crítica. Sin embargo, las ondas de temperatura se mantienen uniforme en los demás canales lo que demuestra que el confort térmico ha aumentado en el interior de la habitación, como se observa en la Figura 15.

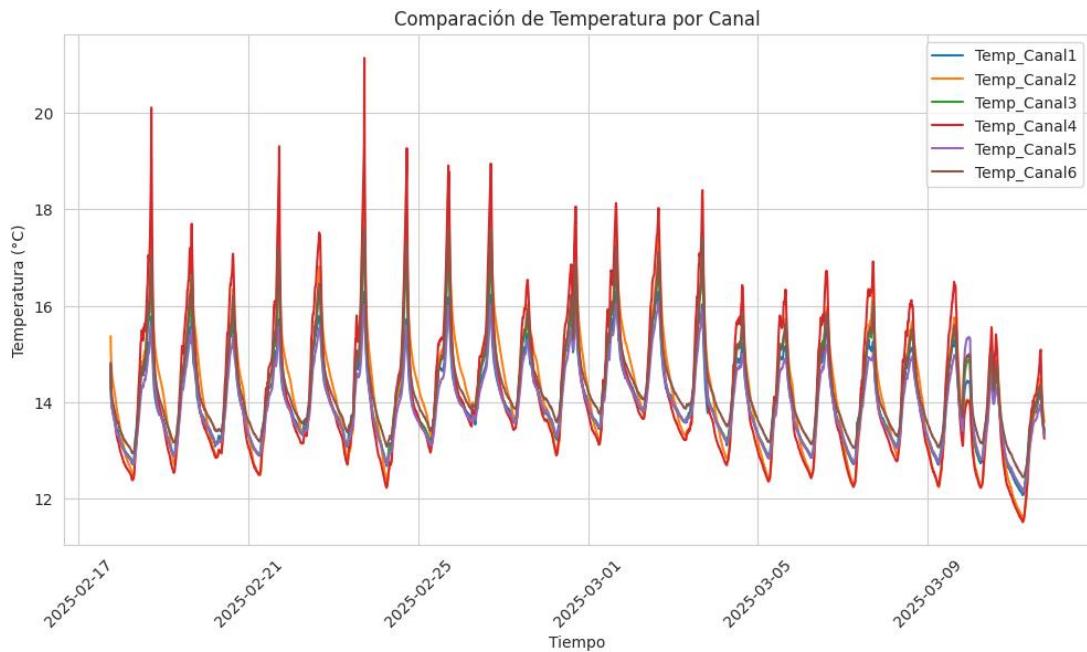


Figura 15. Comparación de temperatura por canal- Dormitorio 02. Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación confirman la efectividad de las estrategias pasivas de aislamiento térmico para mejorar el confort interior en viviendas ubicadas en zonas de clima frío andino, en concordancia con estudios previos realizados en contextos similares. En el trabajo de [7] se evidenció que una doble pared de adobe con aislamiento interior puede incrementar la temperatura interior hasta en 3 °C en entornos rurales, lo cual coincide con el incremento promedio de 2 °C obtenido en este estudio en un contexto urbano tras la rehabilitación de la envolvente térmica. De igual manera, [6] demostraron mejoras significativas en el desempeño térmico mediante el uso de paneles de tierra alivianada en viviendas del sur del Perú, validando la eficacia de soluciones constructivas de bajo costo y fácil implementación.

Asimismo [4] identificó las ventanas como los elementos más críticos en términos de transmitancia térmica, hallazgo concordante con la fase de diagnóstico del presente estudio, donde estos componentes mostraron las mayores pérdidas de calor. No obstante, a diferencia de dichos trabajos, la presente investigación implementó una intervención progresiva e integral en todos los cerramientos muros, techos, pisos y ventanas, lo que permitió un análisis más completo del comportamiento térmico de la envolvente.

Durante el contraste entre la simulación y el monitoreo, se identificó una discrepancia promedio de ± 1.2 °C entre las temperaturas simuladas y las medidas in situ. Estas diferencias se atribuyen principalmente a simplificaciones del modelo energético, como la omisión de cargas internas por ocupación y la variabilidad microclimática no capturada en los archivos climáticos, así como al comportamiento de los ocupantes —por ejemplo, la apertura de ventanas o el uso ocasional de calefactores eléctricos—, que alteraron el equilibrio térmico interior. Este hallazgo coincide con lo planteado por [15], quienes subrayan la importancia de integrar hábitos de confort y ventilación real en la modelización energética para mejorar la precisión predictiva.

En relación con la Norma Técnica EM.110 “Envolvente térmica” del Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú [3], los resultados indican que, aun cuando la vivienda rehabilitada cumple los valores máximos establecidos para la Zona 6 (clima continental muy frío) —2.7 W/m²·K para muros, 1.2 W/m²·K para pisos y 0.8 W/m²·K para techos—, las condiciones interiores no alcanzan plenamente los niveles de confort térmico recomendados por el modelo adaptativo de Fanger

(1977). Las temperaturas operativas post-intervención oscilaron entre 18 °C y 20 °C, con humedades relativas menores al 65 %, lo cual sugiere que los parámetros normativos actuales son insuficientes para contextos de altitud extrema. A partir de la evidencia empírica del presente estudio y de las recomendaciones de [14], se propone readjustar los valores máximos de transmitancia a 0.5–0.8 W/m²·K para muros y 0.6–0.7 W/m²·K para techos, garantizando un mejor comportamiento térmico sin comprometer la viabilidad económica de la vivienda social.

El análisis termográfico mostró pérdidas de calor significativas en muros y ventanas, además de la presencia de puentes térmicos y filtraciones de aire, lo que coincide con lo reportado por Aparco [18]. Este resultado refuerza la validez del enfoque metodológico adoptado, basado en mediciones in situ y simulación energética complementaria. La mejora en la envolvente térmica generó una reducción de la amplitud de las ondas térmicas: antes de la intervención, estas eran divergentes, con descensos bruscos durante la noche; tras la rehabilitación, mostraron mayor uniformidad, lo que evidencia una mayor estabilidad térmica y confort sostenido. Este patrón coincide con el comportamiento descrito por [7] en viviendas experimentales de zonas altoandinas.

En cuanto a los materiales utilizados, la combinación de lana de vidrio ($\lambda = 0.036 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) y poliestireno expandido (EPS, $\lambda = 0.040 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) resultó efectiva por su bajo costo, disponibilidad y facilidad de instalación, en línea con lo propuesto por Canetti [19]. Sin embargo, se recomienda evaluar alternativas locales como la fibra de totora, la lana de alpaca o los paneles de tierra alivianada, los cuales ofrecen prestaciones térmicas comparables, menor impacto ambiental y mayor adaptabilidad cultural al contexto altoandino, como señalan [20].

Finalmente, los resultados de este estudio coinciden con los planteamientos de [21], al destacar la urgencia de fortalecer las políticas públicas y normativas de eficiencia térmica en la vivienda social peruana. Se propone integrar incentivos para la rehabilitación energética, desarrollar manuales técnicos regionalizados y promover programas de educación térmica doméstica que optimicen el uso de las estrategias pasivas y los sistemas de calefacción de bajo consumo. En conjunto, estos esfuerzos permitirían reducir la pobreza energética, mejorar la habitabilidad y contribuir al cumplimiento de los objetivos nacionales de eficiencia energética y sostenibilidad ambiental.

5. CONCLUSIONES

La rehabilitación térmica de la envolvente en viviendas de zonas frías demostró mejorar significativamente el confort interior, con un incremento promedio de 2 °C en la temperatura media y una reducción del 10 % en la humedad relativa. La intervención permitió cumplir los requerimientos mínimos de la norma EM.110, aunque los resultados evidencian la necesidad de readjustar sus parámetros para garantizar el confort térmico en contextos de alta montaña. La estrategia aplicada resultó técnica y económicamente viable para viviendas sociales, destacando la importancia de integrar criterios de aislamiento desde el diseño arquitectónico y de promover políticas públicas que incentiven la rehabilitación térmica en regiones altoandinas.

6. ACERCA DEL ARTÍCULO

Financiamiento: Los autores señalan que la autora principal asumió con recursos propios la adquisición de materiales, gestión e instalación del prototipo con aislamiento térmico.

Este trabajo forma parte de una investigación en curso desarrollada en el marco de la tesis doctoral en Arquitectura de la Universidad de Navarra.

Agradecimientos: Los autores agradecen al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo (PRONABEC – Perú), a través de la Beca Generación Bicentenario, por el apoyo económico otorgado para los estudios doctorales.

Se reconoce el respaldo institucional de la Universidad Nacional del Altiplano y la colaboración de la Universidad de Navarra, que facilitó los sensores y la cámara termográfica empleados en las mediciones.

Contribuciones de autoría:

Sandra Flores Asencio: concepción y diseño de la investigación, análisis e interpretación de datos, redacción y revisión final del manuscrito

Purificación Gonzales Martínez: concepción y diseño de la investigación, revisión crítica del contenido, orientación metodológica y aportes en la discusión y conclusiones

Germán Ramos Ruiz: concepción y diseño de la investigación, supervisión académica, revisión técnica y validación de resultados.

Todos los autores aprobaron la versión final del manuscrito y declaran que el trabajo es original, no ha sido publicado previamente ni se encuentra en evaluación en otro congreso o revista.

Declaración del investigador principal: Declaro que asumo la responsabilidad total por el contenido, la integridad académica y los resultados presentados en este trabajo, garantizando su rigor científico y cumplimiento ético.

Conflictos de interés: Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés relacionado con la investigación, los resultados o la publicación del presente artículo.

REFERENCIAS

- [1] R. Calvo, N. Álamos, M. Billi, A. Urquiza, and R. Contreras Lisperger "Desarrollo de indicadores de pobreza energética en América Latina y el Caribe," Comisión Económica para América Latina y el caribe (CEPAL), Recursos Naturales y Desarrollo, Report 207, 2011. [Online]. Available: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/f3b3060c-94ab-4128-adaf-d56d2e860836/content>
- [2] EM.110 Confort Térmico y Lumínico con Eficiencia Energética, EM.110, Municipalidad Distrital de Santa María del Mar, Lima, Perú, 2016. [Online]. Available: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2686426/EM.110%20Confort%20T%C3%A9rmico%20y%20Lum%C3%ADnico%20Con%20Eficiencia%20Energ%C3%A9tica.pdf?v=1641411379>
- [3] Norma técnica EM.110, Envolvente térmica del reglamento nacional de edificaciones, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Lima Perú, 2022. [Online]. Available: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3453611/Texto%20EM110%20Norma%20vCPA_RNE%20VF%2026.07.2022.pdf.pdf
- [4] L. F. Espinoza Castillo, "Envolvente arquitectónica para la mejora del confort térmico en edificios multifamiliares certificados de la ciudad de Piura (2016-2019)," Tesis de maestría, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú, 2020. [Online]. Available: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/3212>
- [5] M. J. Moro Palomino, "Propuesta de materiales ecológicos no tradicionales para construcciones según la norma EM.110," Tesis de grado, Facultad de ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú, 2020. [Online]. Available: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/24794>
- [6] M. Wieser, S. Onnis, and G. Meli, "Desempeño térmico de cerramientos de tierra alivianada: posibilidades de aplicación en el territorio peruano," *Rev. Arquit.*, vol. 22, no. 1, pp. 164–174, Jan. 2020. <https://revistadearquitectura.ucatolica.edu.co/article/view/2633>
- [7] J. O. Molina Fuertes, M. J. Horn Mutschler, and M. M. Gómez León, "Evaluación sistemática del desempeño térmico de un módulo experimental de vivienda alto andina para lograr el confort térmico con energía solar: Colaboración con el XXIII Simposio Peruano de Energía Solar," *Revista TECNIA*, vol. 30, no. 1, pp. 70–79, May. 2020. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v30i1.841>
- [8] C. P. Endara, M. A. Jiménez Licona, "Evaluación de las transmitancias Térmicas de la casa ecológica andina PUCP del distrito de Langui, provincia de Canas-Cusco, según los parámetros de la norma Técnica peruana EM. 110, para mejorar las condiciones de confort térmico de las viviendas de la zona bioclimática alto andina en el Perú," Tesis de grado, Universidad Andina del Cusco, Cusco, Perú 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.uandina.edu.pe/item/1c7ac987-db6a-46ef-bf06-a6c29e3e456b>
- [9] M. Wieser, A. Garaycochea, and V. Prada, "Improving the thermal performance of schools in the High Andean Region of Peru. The case of 'PRONIED'S prefabricated frost-type modular classrooms," *Rev. hábitat sustentable*, vol. 13, no. 1, pp. 56–67, Jun. 2023. <https://doi.org/10.22320/07190700.2023.13.01.05>

[10] R. García-Alvarado, A. González, W. Bustamante, A. Bobadilla, and C. Muñoz, "Características relevantes de la simulación energética de viviendas unifamiliares," *Inf. Constr.*, vol. 66, no. 533, p. e005, Mar. 2014. <https://doi.org/10.3989/ic.12.108>

[11] V. Macas-Espinosa, I. Portilla-Sánchez, D. Gomez, R. Hidalgo-Leon, J. Barzola-Monteses, and G. Soriano, "Assessment of the energy efficiency and cost of low-income housing based on BIM considering material properties and energy modeling in a tropical climate," *Energies*, vol. 18, no. 6, p. 1500, Mar. 2025. <https://doi.org/10.3390/en18061500>

[12] C. Torres-Aguilar, J. Serrano-Arellano, E. Macias-Melo, and B. Trejo-Torres, "Simulación energética de prototipo de vivienda de interés social para evaluar el confort térmico," *Revista de Ingeniería Civil*, vol. 4, no. 11, pp. 16-21, Jun. 2020. https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_Civil/vol4num11/Revista_de_Ingenieria_Civil_V4_N11_3.pdf

[13] M. C. Bonillas, and J. C. Velasco Benavides, "Estudio y Simulación de la Respuesta Térmica de dos modelos de Vivienda de Interés Social en las Ciudades de Esmeraldas e Ibarra," Tesis de grado, Facultad de ingeniería mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2017. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17405/1/CD-7906.pdf>

[14] M. P. Mazzocco, C. Filippín, H. Sulaiman, and S. F. Larsen, "Performance energética de una vivienda social en Argentina y su rehabilitación basada en simulación térmica," *Ambiente construido*, vol. 18, no. 4, pp. 215-235, Oct-Dec. 2018. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000400302>

[15] B. W. Mangum, and J. E. Hill, "Thermal analysis - human comfort - indoor environments," in *National Bureau of Standards*, Gaithersburg, Maryland, Feb. 1977, p. 205. <https://eric.ed.gov/?id=ED146693>

[16] I. Mino-Rodríguez, I. Korolija, and H. Altamirano, "Thermal comfort in dwellings in the subtropical highlands Case study in the Ecuadorian Andes," in *10th Windsor Conference - Rethinking Comfort*, Windsor, UK, 2018. https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10123813/7/Altamirano_red2018_Mino-RodriguezKorolijaAltamirano_Thermalcomfortindwellingsinthesubtropicalhighlands-CasestudyintheEcuadorianAndes.pdf

[17] IPSOS, "Perfiles socioeconómicos de Lima Metropolitana 2020," ipsos.com, Accessed: Mar. 30, 2025. [Online.] Available: <https://www.ipsos.com/es-pe/perfiles-socioeconomicos-de-lima-metropolitana-2020>

[18] J. J. Aparco Ramos, "Patologías Térmicas de origen físico en la envolvente del Pabellón "O" correspondiente a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, mediante Termografía Infrarroja," Tesis de grado, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica, Perú, 2019. <https://apirepositorio.unh.edu.pe/server/api/core/bitstreams/c3a201b7-ebe5-40d9-9f6c-99e36141cfa6/content>

[19] R. B. Canetti, "Aislantes térmicos alternativos para vivienda adecuada: una propuesta de diseño, social y ambientalmente sustentable," in *Comunicaciones al I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable*, Buenos Aires, Argentina, 2016, pp. 1-6. <https://host170.sedici.unlp.edu.ar/server/api/core/bitstreams/f12089a6-0b7a-49cd-b3ca-d52b72c33d03/content>

[20] R. S. María, "La iniciativa de vivienda saludable en el Perú," *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, vol. 25, no. 4, pp. 419-430, Oct-Dec. 2008. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-46342008000400013&script=sci_arttext&tlang=en

[21] R. Arenas, Y. Fernández Ribaya, J. A. Almagro Medialdea, and J. Xiberta Bernat "Potencial de ahorro de energía térmica en el sector de la vivienda en España, según las directrices establecidas por las políticas energéticas comunitarias y nacionales. Aplicación a un edificio de viviendas de catorce plantas de Gijón (Asturias)," in *Congreso Nacional del Medio Ambiente*, Madrid, España, 2014. pp. 1-16. <https://www.conama.org/conama/download/files/conama2014/CT%202014/1896711520.pdf>