

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

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

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

Martin Wieser

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

Antonio Garaycochea

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

Varinia Prada

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



RESUMEN

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

Palabras clave

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

ABSTRACT

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

Keywords

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

RESUMO

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

Palavras-chave

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

INTRODUCCIÓN

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

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

GEOGRAFÍA, CLIMA Y ARQUITECTURA DEL ÁREA ALTOANDINA

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

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

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

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

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



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

LOS MÓDULOS FABRICADOS TIPO HELADAS (PLAN HELADAS)

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

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

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

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

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

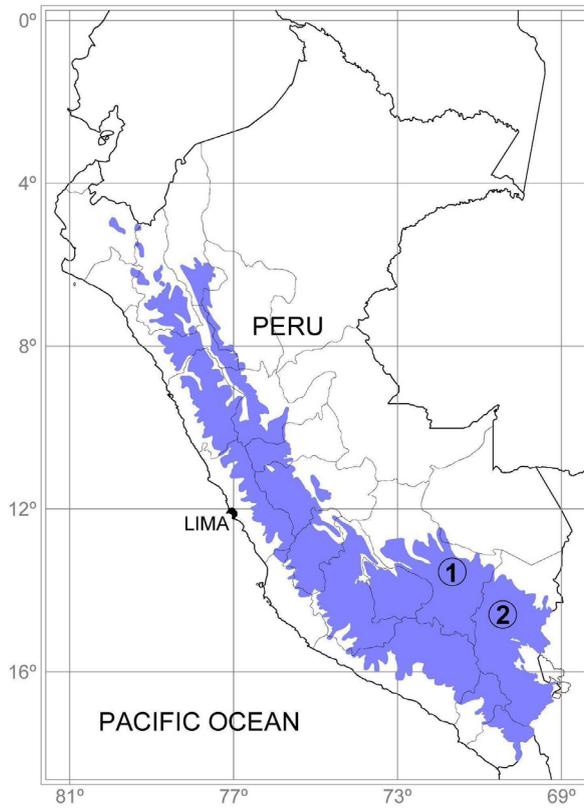


Figura 2. Región altoandina del Perú; altitud igual o superior a los 3.500 m.s.n.m y la ubicación de las escuelas monitoreadas para este estudio: (1) EE 50425, Cusco, latitud -13,42°, longitud -71,65°, altitud 3.737 m.s.n.m; y (2) EE 72073, Puno, latitud -14,68°, longitud -70,35°, altitud 3.913 m.s.n.m.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

METODOLOGÍA

MONITOREO TÉRMICO DE LAS ESCUELAS

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

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

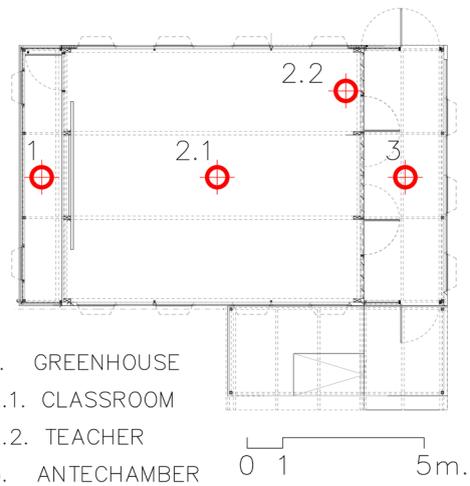


Figura 3. Montaje de la estación meteorológica (izquierda), vista del registrador de datos interior ubicado en el aula (centro) y la ubicación de todos los registradores de datos dentro del módulo (derecha). Fuente: Preparación por los autores.

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

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

CALIBRACIÓN DEL MODELO

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



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

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

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

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

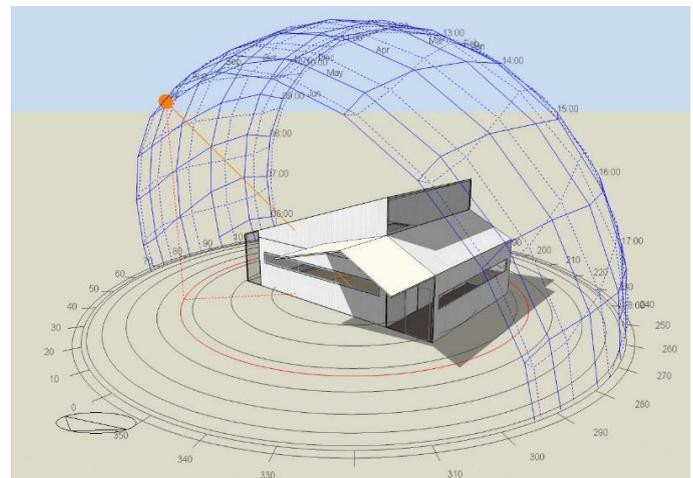


Figura 5. Captura de pantalla del modelo en el software DesignBuilder. Fuente: Preparación por los autores.

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

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

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

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

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

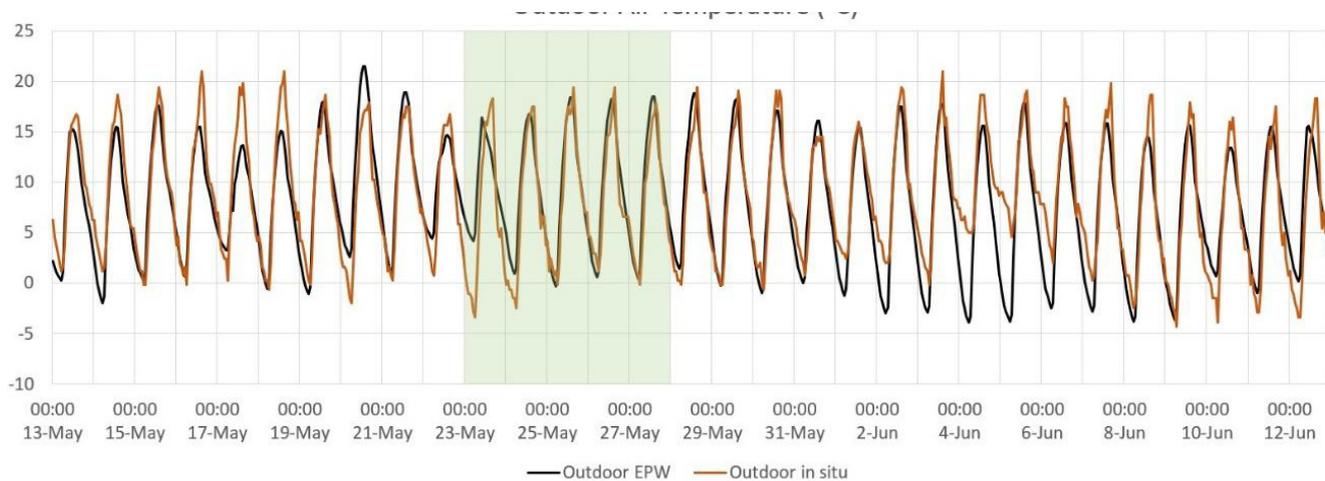


Figura 6. Comparación entre las temperaturas exteriores de la semana representativa en base a mediciones in situ, y las temperaturas exteriores basadas en el archivo .epw. Fuente: Preparación por los autores.

LÍMITES DE CONFORT TÉRMICO

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

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

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

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

SIMULACIONES DE ESCENARIOS PROPUESTOS

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

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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

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

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

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

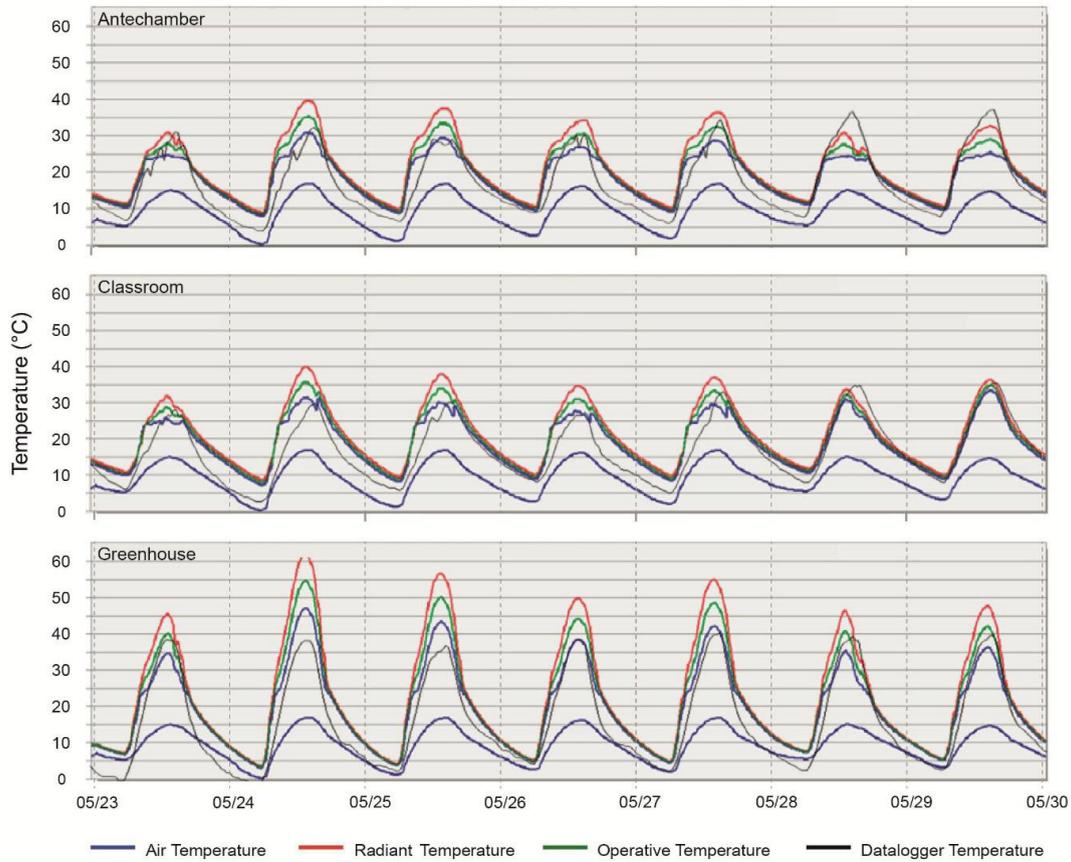


Figura 7. Calibración de la antecámara (parte superior), el aula (al centro) y el invernadero (parte inferior) con temperaturas radiantes (en rojo), temperaturas operacionales (en verde), temperatura externa del aire simulada (en azul) y la temperatura del aire externo medido in situ (en gris).

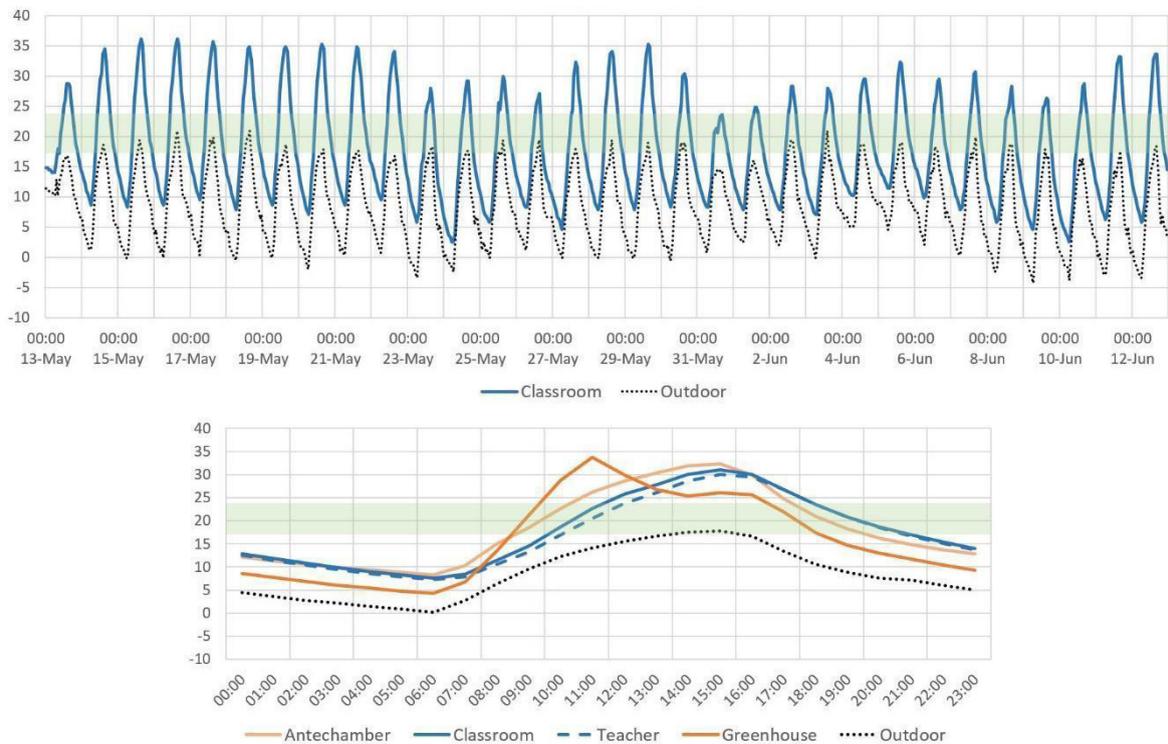


Figura 8. Temperatura del aire en el aula y en el exterior (arriba); temperaturas horarias promedio de todas las salas del módulo (abajo). La zona verde indica los límites de confort. Fuente: Preparación por los autores.

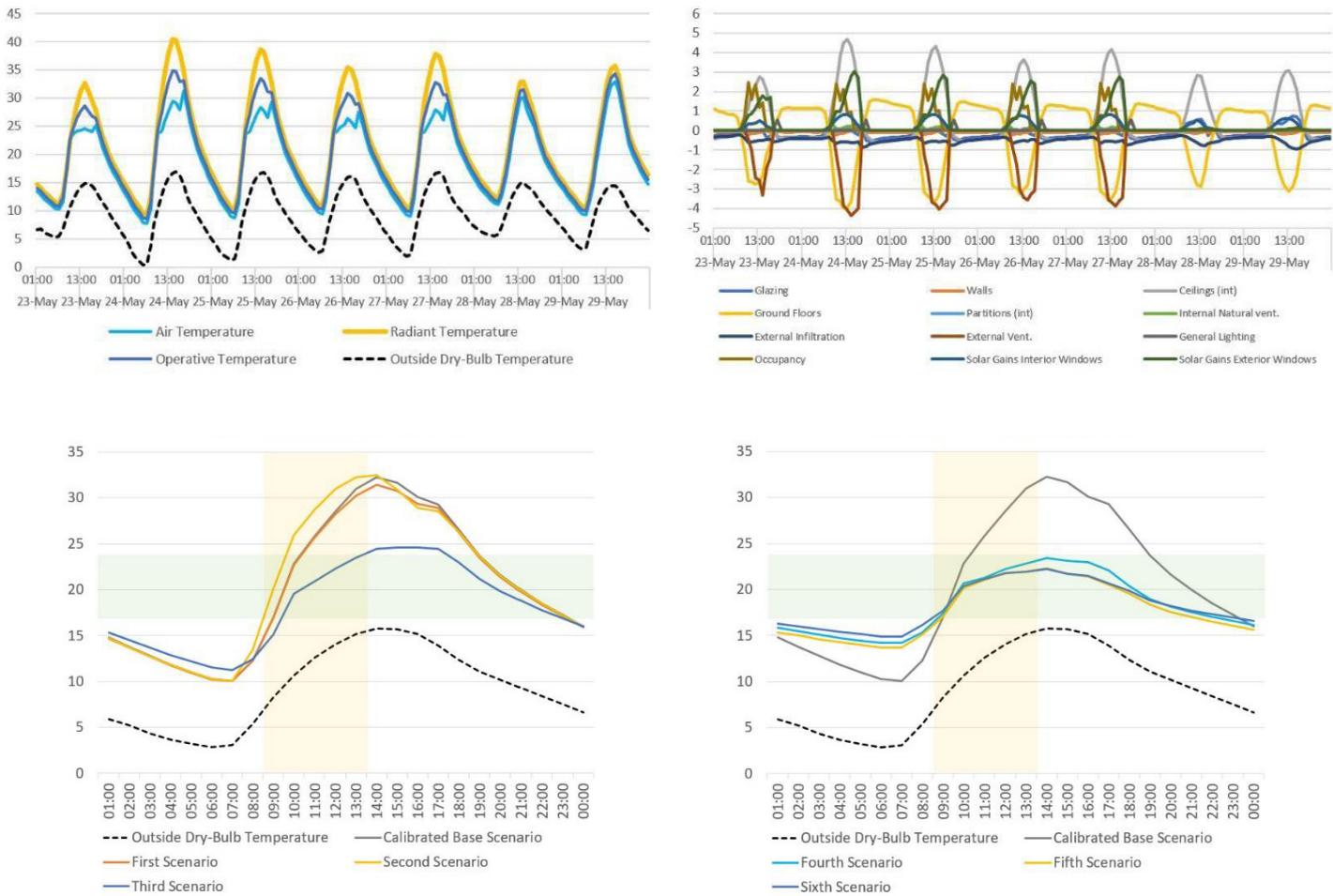


Figura 9. Simulaciones de temperatura y equilibrio térmico de la propuesta base (arriba) y las simulaciones de temperatura de la propuesta base con los seis escenarios propuestos (abajo). La barra verde es la zona de confort y la amarilla es las horas de uso del aula. Fuente: Preparación por los autores.

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

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

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

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

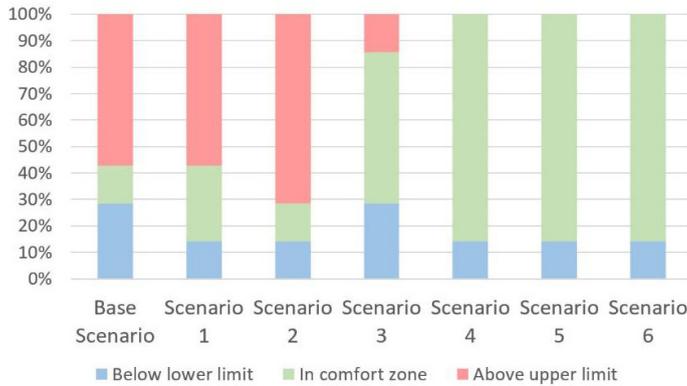


Figura 10. Porcentaje del tiempo en confort térmico durante las horas de clase en cada escenario. Fuente: Preparación por los autores.

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

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

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

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

CONCLUSIONES

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

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

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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