

Mejora del desempeño térmico de las escuelas de la región altoandina del Perú

*Caso de las aulas modulares prefabricadas tipo
heladas del PRONIED*

Ficha del proyecto

<u>Título</u>	Mejora del desempeño térmico de las escuelas de la región altoandina del Perú <i>Caso de las aulas modulares prefabricadas tipo heladas del PRONIED</i>
<u>Autores</u>	Martín Wieser Antonio Garaycochea Varinia Prada
<u>Fecha</u>	2023
<u>Palabras clave</u>	Diseño bioclimático; estrategias pasivas; confort térmico; simulación energética
<u>Contacto</u>	mwieser@pucp.edu.pe v.prada@pucp.pe antonio15192@gmail.com

Resumen

Descripción general

Ante el déficit cualitativo y cuantitativo de infraestructura educativa en las zonas rurales altoandinas del Perú, el Estado peruano ha invertido y apoyado en soluciones modulares en los últimos años, buscando la eficiencia en los procesos constructivos. La propuesta concreta de estas soluciones, con especial énfasis en el diseño bioclimático, es el «Aula Modular Prefabricada tipo Heladas». Sin embargo, los usuarios han expresado su malestar con estas nuevas instalaciones. Este estudio muestra el proceso de medición realizado sobre un módulo construido, que permitió la calibración y validación mediante un software de simulación, para proponer mejoras en el diseño que puedan contribuir a futuras construcciones.

Metodología

La metodología se basa en técnicas de monitoreo realizadas *in situ* y el análisis de los datos obtenidos mediante la calibración y validación del módulo prefabricado en el software DesignBuilder. El monitoreo se realizó en dos escuelas ubicadas en regiones altoandinas (Cusco y Puno), que fueron escogidas tomando en cuenta criterios de accesibilidad, representatividad

y capacidad de medición. En cada escuela se instaló una estación meteorológica exterior (modelo DAVIS Vantage Pro2 Plus™) para medir la temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar horaria. Además, al interior de las aulas de cada escuela, se colocaron ocho *data loggers* que registraron las variaciones de temperatura y humedad relativa cada sesenta minutos durante un mes en la estación más fría del año. Se analizaron dos módulos prefabricados por escuela, con cuatro *data loggers* cada uno. Estos se ubicaron en cada ambiente del módulo prefabricado: uno en la antecámara, dos en el aula (uno al medio y otro en el marco superior de la pizarra) y, el último, en el invernadero. Se eligió un aula, escuela y semana representativa en las cuales las condiciones climáticas y el uso de los interiores en este período fueran más consistentes con un período típico en cuanto a las temperaturas esperadas para la temporada y los horarios regulares de clases.

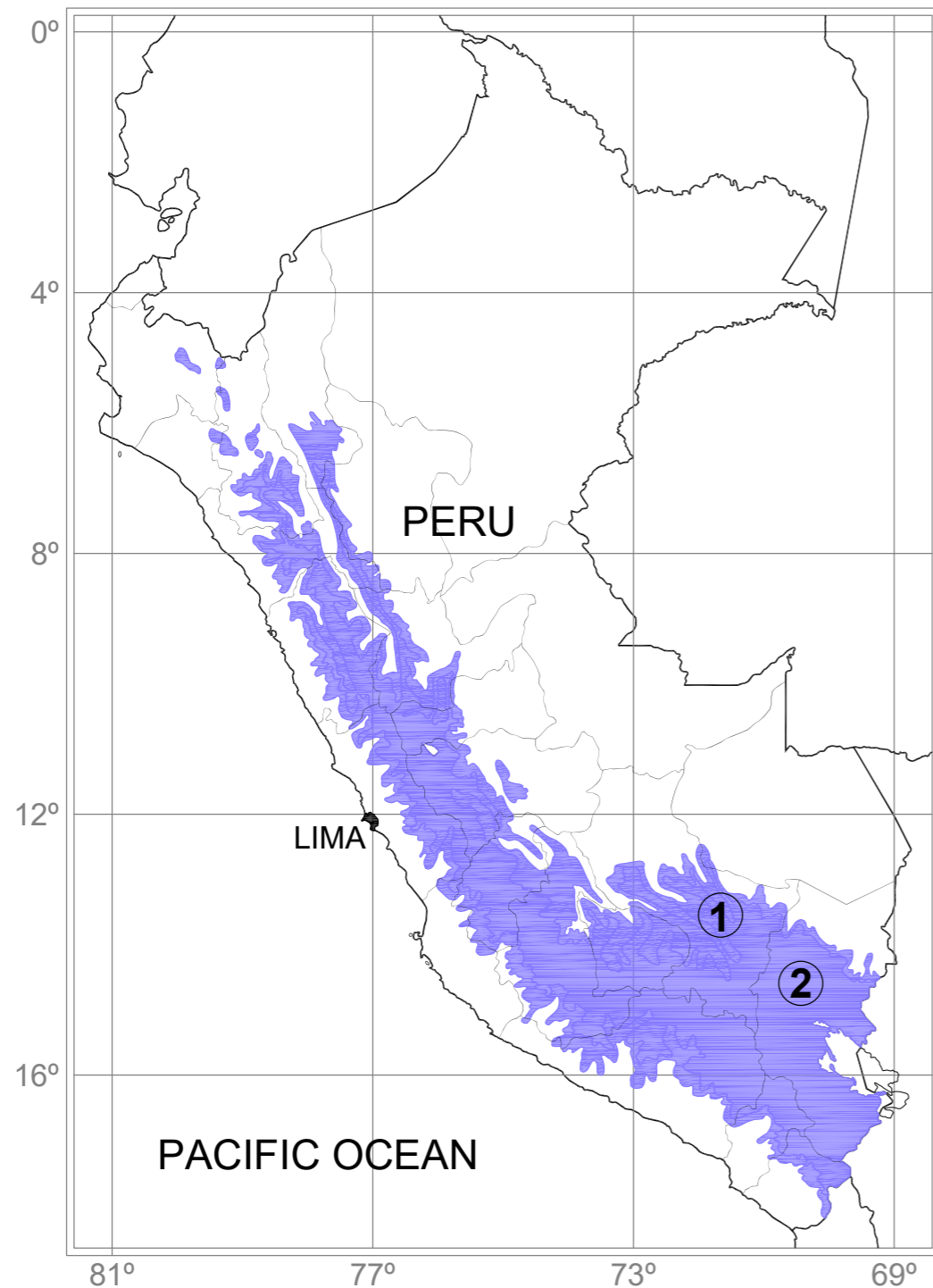
Una vez procesados, los datos obtenidos de los registradores se usaron para calibrar una simulación térmica dentro del software DesignBuilder, que reflejó el estado actual de los módulos. Considerando las coordenadas geográficas del colegio, se utilizó el software Meteonorm para generar

un archivo con extensión EnergyPlus Weather Format (EPW), que contiene información sobre el «año meteorológico típico». Este archivo se integró en el modelo DesignBuilder y permitió elegir un período en el que las condiciones de temperatura fueran equivalentes a las medidas *in situ* durante cinco días hábiles, de lunes a viernes.

Se realizaron simulaciones con las temperaturas de los ambientes registrados (antecámara, aula e invernadero). En la medida en que la geometría, los materiales y el uso del módulo fueran variables suficientemente fiables, se asignaron diferentes valores de hermeticidad (cambios de aire por hora) a los ambientes hasta que la coincidencia entre lo medido y lo simulado fuera lo más cercana posible. El uso de los espacios y las aperturas se identificó a través de observaciones de campo, entrevistas y un registro realizado durante dos visitas. Estos cronogramas fueron incorporados al modelo. Por último, para evaluar las condiciones térmicas ambientales al interior de las aulas, y considerando que no existen normas nacionales que delimiten una zona de confort, se utilizó la teoría del confort adaptativo, tomando como referencia la Norma 55-2017 de ASHRAE (2017).

Objetivos

1. Analizar la pertinencia de las estrategias bioclimáticas utilizadas en el diseño arquitectónico del módulo de heladas reconociendo las particularidades del clima frío tropical de altura.
2. Contribuir a mejorar el rendimiento térmico de los módulos prefabricados de heladas mediante la simulación de diferentes escenarios hipotéticos, aplicando técnicas de diseño bioclimático, modos de uso y variaciones de orientación.



1

El Perú se ubica en una zona tropical, lo que condiciona un clima de altura con radiación solar muy intensa, poca variación entre estaciones, temperaturas moderadas durante el día y muy frías en la noche (Vidal, 2014). Aproximadamente el 20 % del territorio peruano se encuentra en la región altoandina. En esta región, que tiene un clima único y muy duro, las estaciones se diferencian por la época de lluvias y las temperaturas nocturnas. En los meses de diciembre a marzo hay lluvias recurrentes y las temperaturas suelen estar ligeramente por encima de los 0 °C en la noche y por encima de los 15 °C durante el día. En los meses más fríos, entre junio y agosto, las lluvias son escasas, el cielo suele estar despejado y las noches son más frías, con heladas regulares, lo que implica temperaturas nocturnas por debajo de los 0 °C. En general, las temperaturas diurnas se mantienen estables durante todo el año y la humedad relativa del aire es baja.

En la región, las técnicas de construcción tradicionales emplean materiales masivos, como piedra o tierra cruda para las paredes, y tejidos de fibras naturales para los techos. Estas construcciones presentan una alta inercia térmica en las paredes y un buen aislamiento en los techos, junto con una forma compacta y aberturas

muy pequeñas, lo que proporciona cierta estabilidad térmica interna. Sin embargo, la falta de elementos traslúcidos y la dificultad para lograr un nivel mínimo de hermeticidad resultan en temperaturas interiores significativamente bajas. Diversos autores coinciden en que las estrategias bioclimáticas para este clima se centran en el aislamiento e inercia térmica de la envolvente, la hermeticidad y el aprovechamiento de la radiación solar (Givoni, 1992; Szokolay, 2012; Manzano-Agugliaro *et al.*, 2015).

El módulo estudiado es parte del Catálogo Escolar Modular propuesto por el Programa Nacional de Infraestructura Educativa (PRONIED, 2021), busca desarrollar un sistema donde el diseño cumpla con criterios de pertinencia según las condiciones climáticas de cada región, calidad de infraestructura y eficiencia respecto a la estandarización del diseño y sus especificaciones técnicas para hacer más eficientes los procesos de adquisición, transporte e instalación de los módulos. Se han implementado dos versiones de diseño en el módulo de heladas y, con este estudio, se busca contribuir a mejorar el diseño de la futura tercera versión a través del monitoreo y validación térmica de la segunda versión del módulo.

1 Región altoandina del Perú, altitud igual o mayor a 3500 m s.n.m. y la ubicación de las escuelas monitoreadas para este estudio: (1)

I.E. 50425, Cusco, latitud -13.42°, longitud -71.65°, altitud 3,737 m s.n.m. y (2) I.E. 72073, Puno, latitud -14.68°, longitud -70.35°, altitud

3,913 m s.n.m. Fuente: Elaboración propia, 2023.



2

En términos generales, las paredes y los techos se componen de paneles sándwich de poliuretano termoacústico y las superficies translúcidas de paneles de policarbonato celular; mientras que el piso es una losa de hormigón armado con aislamiento de lana. El horario de uso de las aulas es de ocho y media de la mañana a una y media de la tarde.

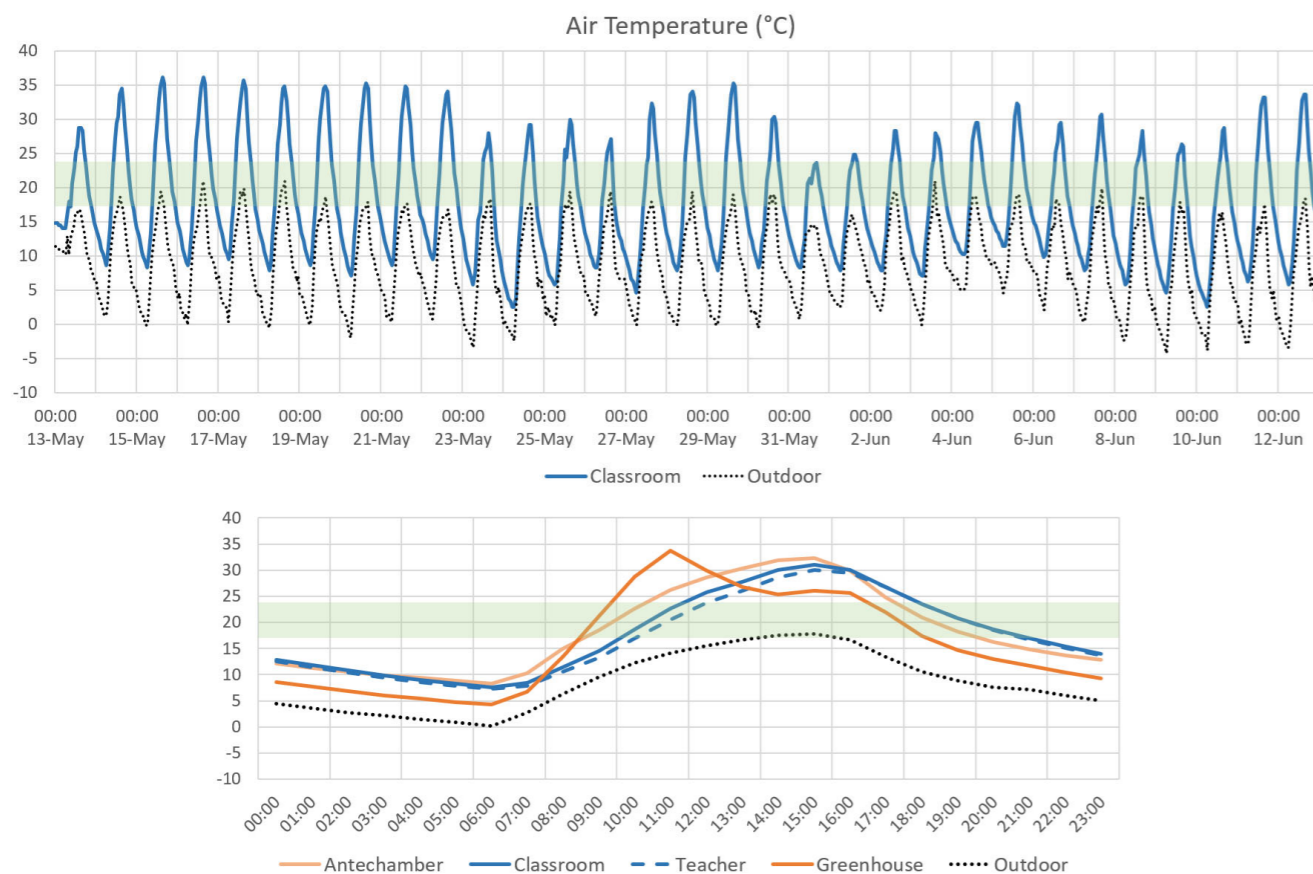
En primer lugar, se calibró el modelo base, luego se realizaron simulaciones adicionales con diferentes estrategias bioclimáticas, estas se aplicaron reconociendo las particularidades del clima frío tropical de altura y en base a las temperaturas alcanzadas, así como al balance térmico presentado por el software. Se simularon cinco escenarios diferentes basados en el modelo original, incorporando las siguientes estrategias:

1. Reducción de infiltraciones / Aumento de la capacidad de ventilación
2. Orientación y estanqueidad del invernadero: envolvente y orientación
3. Mayor aislamiento y sustitución de transparencias en cubiertas
4. Exposición de la masa térmica del suelo
5. Estricto horario de apertura de puertas y ventanas
6. Adición de masa térmica

Aplicando las fórmulas del modelo de confort adaptativo e identificando la temperatura media del mes en $8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, la zona de confort térmico en las semanas medidas estaría aproximadamente entre $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Además, existe una variación mínima entre las temperaturas de la antecámara, el invernadero, el salón de clases ya que en todos los ambientes existe una oscilación térmica amplísima de alrededor $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, con temperaturas muy por encima del límite de confort en las horas cercanas al mediodía (ver Figura 3). El invernadero es el primer ambiente en calentarse y enfriarse, pero su temperatura no difiere del resto de ambientes, teniendo en cuenta de que son incluso inferiores a las de la antecámara.

Las bajas temperaturas en el aula al comienzo del día ($5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima de la temperatura exterior) muestran la facilidad con la que se pierde calor por la noche. Por otro lado, llama la atención lo abrupto que puede levantarse en las primeras horas de la mañana; aproximadamente $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ en solo tres horas. La temperatura del aula en la tarde puede llegar a superar los $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que hace que sea prácticamente inhabitable. Los factores que causan que la temperatura en las primeras horas de la mañana sea bastante

2 Ubicación (arriba) y vista de los módulos (abajo) en Institución Educativa 72073, Puno. Fuente: Elaboración propia, 2022.



3

baja (8 °C) son: que el ambiente no esté ocupado durante la noche y la ausencia de masa térmica. Además, el exceso de material traslúcido, la ausencia de masa térmica y el escaso uso de la ventilación natural elevan la temperatura interior de forma brusca y excesiva desde las primeras horas de la mañana.

Como se puede observar en la Figura 3, el principal problema en estos dos primeros escenarios, además del base, es el exceso de calor al interior del aula. El tercer escenario, donde se elimina la transparencia de los techos y se aumenta el aislamiento del falso techo, muestra un cambio sustancial en el comportamiento de la temperatura interior. Las temperaturas máximas se reducen entre 7 °C y 8 °C hasta unos 25 °C, mientras que las mínimas aumentan ligeramente 2 °C, alcanzando los 12 °C aproximadamente.

En el Escenario 4 se mantienen los cambios de techo y cielo raso del escenario anterior, a la vez que se activa el intercambio de aire entre el aula y el invernadero en las primeras horas de la mañana. Además, se retira el aislamiento térmico en el piso, reconociendo este como uno de los pocos que aporta masa térmica. El resultado muestra una mejora en las posibilidades de proporcionar confort térmico. Por un lado, las temperaturas en los

momentos más calurosos del día no superan los 24 °C, mientras que, al inicio del día, las temperaturas más frías rondan los 15 °C, cinco grados por encima del módulo base.

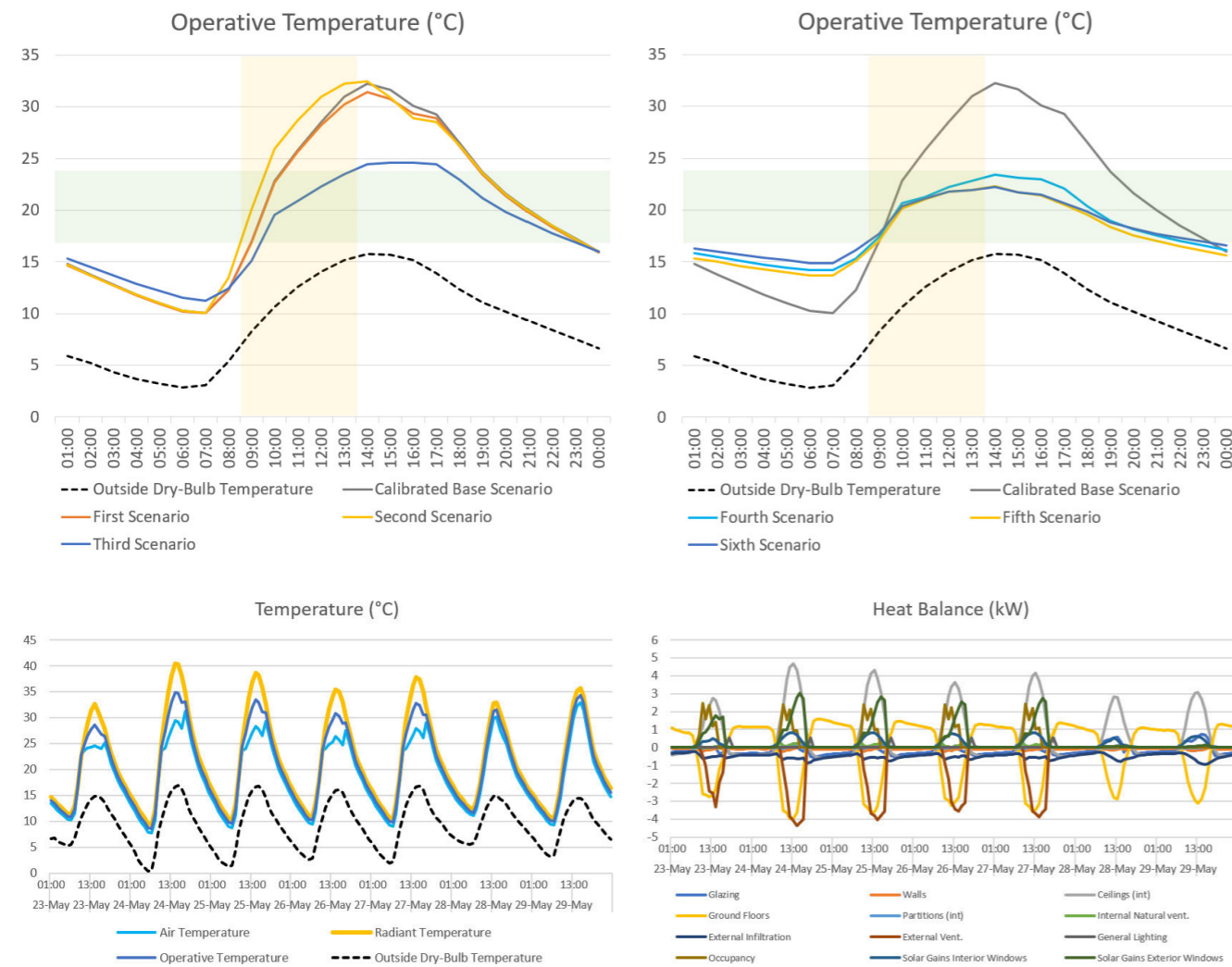
El quinto escenario, donde se mantienen las condiciones del escenario anterior, se considera la losa apoyada en el suelo y se añade una mayor capacidad de ventilación natural en los momentos de mayor calor. Adicionalmente, se mantienen las puertas cerradas y los respiraderos abiertos entre el invernadero y el salón de clases en la madrugada. Con estos cambios, los valores de temperatura mínima y máxima parecen ser muy similares.

Finalmente, en un sexto escenario se configuró la masa térmica en el espacio interior: se sustituyó el muro que divide el aula y el invernadero por un grueso muro de adobe, para calentarlo durante el día y no estar expuesto al ambiente exterior durante la noche. Los resultados muestran un comportamiento aún mejor, con temperaturas mínimas al inicio de clases a solo 2 °C del límite inferior de la zona de confort.

En general, a partir del cuarto escenario donde se expone la masa del suelo, y más aún en el último escenario donde se suma la

3 Temperatura del aire exterior y del salón de clases (arriba); temperaturas medias por hora de todos los ambientes del módulo

(abajo). La zona verde indica los límites de confort. Fuente: Elaboración propia, 2023.



4 Simulaciones de temperatura y balance térmico de la propuesta base (arriba) y simulaciones de temperatura de la

propuesta base con los 6 escenarios propuestos (abajo). La barra verde es la zona de confort y la amarilla las horas de uso del aula.

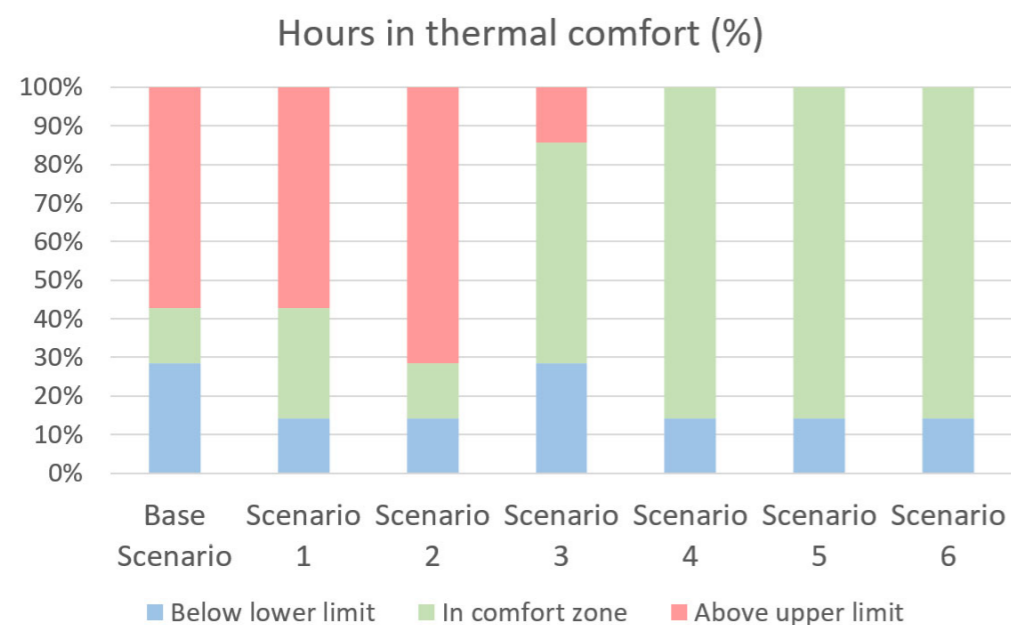
4

masa térmica de un muro, se hace evidente la importancia de esta estrategia, sobre todo para controlar el aumento de temperatura alrededor del mediodía. Sin embargo, sus limitaciones también se hacen patentes, ya que la ausencia de cargas térmicas cuando no hay clases y la propia dureza del clima no permiten mantener los valores ideales de temperatura hasta la mañana siguiente.

Si bien la propuesta original del módulo considera acertadamente la inclusión de la estrategia de captación solar en la Puna peruana, el exceso de captación solar directa a través del techo translúcido implica un aumento notorio de la temperatura en momentos no necesarios. La captación indirecta a través del invernadero es suficiente para conseguir el aumento deseado, pero solo si se orienta hacia el Este para que dicho aumento de temperatura se produzca durante las primeras horas de la mañana. Una segunda condición determinante es reconocer la poca masa térmica que tiene el proyecto y que esta se ubica en el suelo. Retirar el aislamiento permite amortiguar ligeramente la temperatura interior a lo largo del día.

Es posible mejorar las condiciones en la mañana y mantenerlos dentro del rango de confort en las primeras horas de la

tarde —junto con la menor superficie translúcida, la correcta orientación del invernadero, la exposición de la masa térmica en el piso y la versatilidad en la ventilación entre el invernadero, el salón de clases y el exterior—, permitiendo mantener condiciones de confort térmico durante la mayor parte de las horas de uso. Finalmente, se reconocen las limitaciones que tienen las estrategias bioclimáticas en una edificación de estas características y en un clima tan duro como el de la Puna, pues las edificaciones no se usan continuamente y la consideración de la masa térmica es limitada por la ligereza de los materiales que exige la modularidad. Aunque al mediodía es posible controlar las condiciones por la versatilidad de la ventilación natural, será difícil tener confort térmico a primera hora de la mañana si no hay sistemas de calefacción solar activos o sistemas de calefacción artificial.



5

5 Porcentaje de tiempo en confort térmico durante las horas de clase en cada escenario.

Bibliografía y recursos

- ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2017). Standard 55-2017 *Thermal environmental conditions for human occupancy*.
- Bos, María Soledad, Ganimian, Alejandro y Vegas, Emiliana (2014). *Brief N°13: Perú en PISA 2012 logros y desafíos pendientes*. BID. <https://repositorio.minedu.gob.pe/handle/20.500.12799/3814>
- Burga, Jorge (2010). *Arquitectura vernácula peruana: un análisis tipológico*. Colegio de Arquitectos del Perú.
- Chui Betancur, Heber, Huaquisto Ramos, Edilberto, Quispe, Germán, Canales Gutiérrez, Ángel y Calatayud Mendoza, Alfredo (2022). Características de la arquitectura vernácula en zonas altoandinas de Perú. Una contribución al estudio del mundo rural. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 15, 1-15. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cvu15.cavz>
- Geng, Yang, Ji, Wenjie, Lin, Borong y Zhu, Yingxin (2017). The impact of thermal environment on occupant IEQ perception and productivity. *Building and Environment*, 121, 158-167. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.022>
- Givoni, Baruch (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and buildings*, 18(1), 11-23. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90047-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K)
- Haves, Philip Ravache, Baptiste, Fergadiotti, Andres, Kohler, Christian y Yazdanian, Mehry (2019). Accuracy of HVAC Load Predictions: Validation of EnergyPlus and DOE-2. Using an Instrumented Test Facility. *16th International Building Performance Simulation Association - International Conference and Exhibition, Roma, Italia, 4329-4336*. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.211268>
- Kükrer, Ergin y Eskin, Nurdil (2021). Effect of design and operational strategies on thermal comfort and productivity in a multipurpose school building. *Journal of Building Engineering*, 44, 102697. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102697>
- Manzano-Agugliaro, Francisco, Montoya, Francisco G., Sabio-Ortega, Andrés y García-Cruz, Amós (2015). Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (49), 736-755. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>
- Mazzeo, Domenico, Matera, Nicoletta, Cornaro, Cristina, Oliveti, Giuseppe, Romagnoni, Piercarlo y De Santoli, Livio (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. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109812>

- Molina, Jessica R., Lefebvre, Gilles, Espinoza, Rafael, Horn, Manfred y Gómez, Mónica 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. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110605>
- Programa Nacional de Infraestructura Educativa – PRONIED (2021). *Ficha de Homologación de Módulo Prefabricado Aula tipo Heladas*. Ministerio de Educación. <https://www.gob.pe/institucion/pronied/campa%C3%B1as/4440-fichas-de-homologacion-de-modulos-prefabricados>
- Pulgar Vidal, Javier (2014). Las ocho regiones naturales del Perú. *Terra Brasilis Revista da Rede Brasileira de História da Geografia e Geografia Histórica*, (3). <https://doi.org/10.4000/terrabrasilis.1027>
- Sáez, Elia y Canziani, José (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. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-1-2020-175-2020>
- Szokolay, Steven (2012). *Introduction to architectural science*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780080473130>
- Torres Puñez, Camila M. (2021). *Construyendo la educación: infraestructura como determinante del rendimiento académico en el Perú 2000-2015* [tesis de grado en Economía, Universidad de Lima]. <https://hdl.handle.net/20.500.12724/13874>
- Tremblay, Joshua C. y Ainslie, Philip N. (2021). *Global and country-level estimates of human population at high altitude. Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(18), e2102463118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2102463118>
- Wargocki, Pawel, Porras-Salazar, Jose A. y Contreras-Espinoza, Sergio (2019). The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment*, 157, 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.046>
- Wieser, Martin, Rodríguez-Larraín, Sofía y Onnis, Silvia (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. <https://doi.org/10.18537/est.v010.n019.a01>
- Zomorodian, Zahra S., Tahsildoost, Mohammad y Hafezi, Mohammadreza (2016). Thermal comfort in educational buildings: A review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 895-906. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.033>

Dosieres CIAC

© De los autores, 2023

EditoresLuis Rodríguez Rivero
Gary Leggett Cahuas
Ingrid García WestphalenDiseño gráfico

Gary Leggett Cahuas

DiagramaciónIngrid García Westphalen
Natalia Talledo FonkenRevisión de estilo

Lucía Patsías Valle

