



Revista de Arquitectura (Bogotá)

ISSN: 1657-0308

ISSN: 2357-626X

Universidad Católica de Colombia, Facultad de Diseño y
Centro de Investigaciones (CIFAR)

Herrera-Sosa, Luis Carlos; Villena-Montalvo, Edgar Elias; Rodríguez-Neira, Karin Rosario

Evaluación del desempeño térmico del sillar (ignimbrita) de Arequipa, Perú

Revista de Arquitectura (Bogotá), vol. 22, núm. 1, 2020, Enero-Junio, pp. 152-163

Universidad Católica de Colombia, Facultad de Diseño y Centro de Investigaciones (CIFAR)

DOI: <https://doi.org/10.14718/RevArq.2020.2261>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=125165763014>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org
UAEM

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Evaluación del desempeño térmico del sillar (ignimbrita) de Arequipa, Perú

Evaluation of the ashlar (ignimbrite) thermal performance of Arequipa, Peru

Luis Carlos Herrera-Sosa

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (México)

Instituto de Arquitectura, diseño y Arte (IADA)

Édgar Elías Villena-Montalvo

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (Perú)

Karin Rosario Rodríguez-Neira

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (Perú)

Luis Carlos Herrera-Sosa

Arquitecto, Escuela de Arquitectura de Chihuahua. Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua (México).

Maestría en Arquitectura Bioclimática, Escuela de Arquitectura y Diseño de América Latina y el Caribe. Panamá (Panamá).

Doctorado en arquitectura, Facultad de Arquitectura, Universidad de Colima. Coquimatlán (México).

Miembro, Sistema Nacional de Investigadores. Conacyt. 2016-2019.

✉ <https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=jxculjgAAAAJ>

✉ <https://orcid.org/0000-0002-7663-200X>

moreguachi@gmail.com; carlos.herrera@uacj.mx

Édgar Elías Villena-Montalvo

Arquitecto, Universidad San Antonio Abad. Cusco (Perú).

Máster en Docencia e Investigación Universidad Hermilo Valdizan Huanuco. Huanuco (Perú).

Especialista en gestión ambiental, Universidad Agraria La Molina. Lima (Perú).

✉ <https://orcid.org/0000-0002-9661-4677>

evillena@unsa.edu.pe

Karin Rosario Rodríguez-Neira

Arquitecta, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNAS) (Perú).

Máster en diseño y gestión ambiental de edificios, Universidad de Navarra. Pamplona (España).

✉ <https://orcid.org/0000-0002-2199-9234>

krodriguezn@unsa.edu.pe

Herrera-Sosa, L.C., Villena-Montalvo, E. E. & Rodríguez-Neira, K. R. (2020). Evaluación del desempeño térmico del sillar (ignimbrita) de Arequipa, Perú. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 22(1), 152-163. <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2020.2261>



dx.doi.org/10.14718/RevArq.2020.2261

Resumen

El sillar, material de construcción para muros y cubiertas de uso común en Arequipa (Perú), ha perdido vigencia debido, entre otras cosas, al desconocimiento de su desempeño térmico. Por ello, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el desempeño térmico de este material en comparación con el adobe, el ladrillo de arcilla y la bloqueta de concreto. La metodología consistió en un monitoreo experimental de seis módulos en verano y ocho en invierno, en modelos de campo con análisis de causa-efecto por medio de simulación. Comparando la temperatura del aire exterior e interior con la de confort, se determinó qué material tiene mejor desempeño térmico en temporadas de verano e invierno. Con el software DesignBuilder V4.7, se simularon térmicamente los módulos, se correlacionaron los resultados para su validación y se obtuvieron los consumos energéticos. Los resultados de campo arrojaron que el sillar, en su colocación en soga y canto, es el de mejor desempeño térmico, mientras que la bloqueta de concreto es el más ineficiente.

Palabras clave: calor específico; conductividad térmica; desempeño térmico; eficiencia energética; ladrillo tipo sillar; masa térmica; material de construcción; transmitancia térmica

Abstract

The ashlar, construction material for walls and roofs commonly used in Arequipa (Peru) has lost its validity of use, due, among other things, to ignorance about its thermal performance. Thus, the aim of this research was to evaluate such performance compared to adobe, clay brick and concrete block. The methodology consisted of an experimental monitoring of six modules in summer and eight in winter, in field models with cause-effect analysis through simulation. By comparing the temperature of the outdoor and indoor air with that of comfort, the material that has the best thermal performance in the two climatic seasons of Arequipa was identified. With the use of the DesignBuilder V4.7 software, the modules were thermally simulated, the results were correlated for validation and energy consumption indices were obtained. Field results showed that the ashlar in its soga and canto placement shows the best thermal performance, while the concrete block is the most inefficient.

Keywords: specific heat; thermal conductivity; thermal performance; energy efficiency; ashlar brick; thermal mass; building material; thermal transmittance

Recibido: septiembre 10 / 2018

Evaluado: octubre 15 / 2019

Aceptado: noviembre 23 / 2019

Introducción

El propósito del presente artículo es presentar los resultados de la evaluación del desempeño térmico del sillar colocado en canto y soga con 0,19 y 0,30 m de espesor, respectivamente, en comparación con 3 materiales de construcción para muros: adobe de 0,20 m de espesor; ladrillo colocado en cabeza y soga con 0,24m y 0,14 m de espesor, respectivamente, y bloqueta de concreto de 0,14 m de espesor, enmarcado todo ello dentro del proyecto de investigación de nombre *Evaluación del Comportamiento Térmico del Sillar de la Provincia de Arequipa, para su Aplicación como Material de Construcción que Permita Reducir el Consumo Energético y Optimizar el uso de Energías Pasivas*, financiado por la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú.

El sillar es una roca piroclástica que cubre grandes extensiones del flanco occidental andino del Perú. Existe un gran número de depósitos de flujos piroclásticos con el nombre de sillar, o piedra sillar, que es una denominación exclusivamente local para la ignimbrita. La ignimbrita es una roca ígnea producto del depósito volcánico, y que consiste en toba dura compuesta de fragmentos de roca y fenocristales en una matriz de fragmentos de vidrio semejantes a polvo, junto

con pedazos de piedra pómez y bloque de lava densa (fiames) (Lara-Galindo, 1988, p. 7).

El departamento de Arequipa se encuentra al sur de Perú. Limita al norte con Ayacucho, Apurímac y Cuzco; al este, con Puno; al sureste, con Moquegua; al oeste, con el océano Pacífico, y al noroeste, con Ica. Su capital, la ciudad de Arequipa, se ubica en las coordenadas geográficas de 16°23'56" latitud sur y 71°32'13" longitud oeste, y a una altitud media de 2335 msnm (figura 1).

De acuerdo con el anexo No. 1 del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) (2016), la ciudad de Arequipa se localiza en la zona climática 4-Mesoandino. Esta zona se caracteriza por tener un clima de semifrío a frío, con terreno semi-seco a lluvioso, con temperatura promedio anual de 12 °C, humedad relativa del 30% al 50% y una precipitación pluvial de 95 mm, en promedio. De acuerdo con la clasificación de Köppen-Geiger (2007), se ubica en Bwk: clima seco, desértico y frío, respectivamente.

El diagnóstico bioclimático de Arequipa define dos temporadas climáticas: temporada de verano y temporada de invierno. La primera temporada tiene una duración de diciembre a marzo, y se caracteriza por ser una estación de clima templado y subhúmedo. Sus principales indicadores son: temperatura máxima promedio de 21,30 °C, temperatura promedio de 15,9 °C, temperatura mínima promedio de 10,5 °C, humedad relativa promedio del 57,2% y una radiación sobre superficie horizontal promedio de 5,130 Wh/m². La segunda temporada transcurre de abril a octubre, y se caracteriza por ser una estación de clima frío y semiseco. Sus principales indicadores son: temperatura máxima promedio de 21,6 °C, temperatura promedio de 14,9 °C, temperatura mínima promedio de 8,2 °C, humedad relativa promedio del 39,3% y una radiación sobre superficie horizontal promedio de 4,994 Wh/m².

Las estrategias de climatización pasiva para ambas temporadas son: ganancia solar pasiva, protección solar, ganancias de calor internas, protección contra el viento, aislamiento selectivo y uso de materiales con masa térmica alta.

El sillar como material de construcción en muros fue utilizado, principalmente, por sus cualidades mecánicas y constructivas, por los habitantes originales de la región de Arequipa muchos años antes de la llegada de los españoles, pues su uso como elemento estructural tiene una capacidad resistente a la compresión bastante cercana a la de un ladrillo de arcilla tipo II, lo que permite utilizarlo en albañilería portante y en techados de forma curva, donde, mayormente, trabaja la compresión (Lara-Galindo, 1988, p.13).



Figura 1. Localización de la ciudad de Arequipa.

Fuente: elaboración propia, con base en el Mapa Climático del Perú (2018).

El uso del sillar solo tenía competencia con materiales regionales como la tierra, el adobe o técnicas milenarias de construcción. Según Cornejo et al. (2018, p. 46), el sillar posee excelentes cualidades térmicas, porque conserva de manera agradable la temperatura de las viviendas, pues actúa como regulador reteniendo el calor o irradiándolo suavemente; incluso, se lo considera un material muy bueno para la construcción, ya que es blando durante su extracción y endurece al contacto con el aire, por lo cual es un buen aislante de espacios (Cornejo et al., 2018, p. 35). No obstante, con la aparición de nuevos materiales, como el ladrillo de arcilla cocida de 0,14 m y el bloque de concreto de 0,20 m de espesor, su uso fue perdiendo vigencia, debido a la facilidad de obtención y de elaboración de esos materiales, así como su rapidez de construcción, su costo y su uso extendido a escala nacional e internacional.

A diferencia de los materiales y las técnicas tradicionales, como el adobe de 0,40 m y la tierra apisonada de 0,40 m, estos nuevos materiales no cumplen de manera adecuada con los requerimientos térmicos que demanda el clima de Arequipa, pues, de acuerdo con el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) (2016), en esta zona 4-mesoandino, los materiales deben tener una transmitancia térmica máxima en muros de 2,36 W/m² K, valor que no cumplen el *block* de concreto de 0,20 m ni el ladrillo de 0,15 m, pues tienen una transmitancia térmica de 3,33 W/m² K y de 2,56 W/m² K, respectivamente.¹ Incluso si se utilizan valores de otras fuentes, con una conductividad térmica de 1,7 W/m K para el concreto simple y de 0,60 W/m K para el

¹ Para el cálculo de la transmitancia térmica se utilizaron los valores de conductividad del Anexo No. 3 del RNE (2016), pp. 523108-523110. Concreto simple 1,51 W/m K y 0,84 para el ladrillo común (RNE, 2016).

Figura 2. Ubicación de los módulos.

Fuente: elaboración propia (2017).

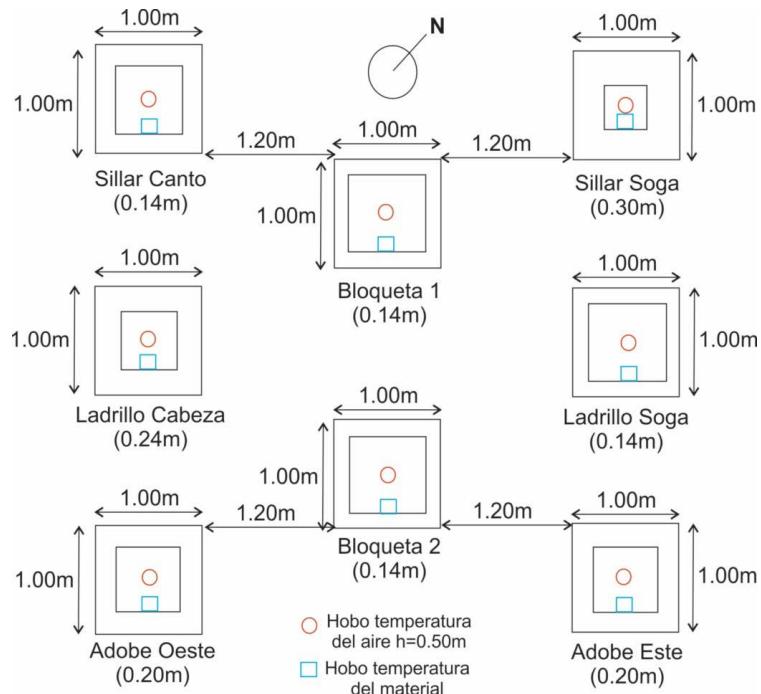


Figura 3. Aislamiento en cubierta de los módulos.

Fuente: elaboración propia (2017).

Figura 4. Aislamiento en piso de los módulos.

Fuente: elaboración propia (2017).



ladrillo (Cedeño, 2010), o, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER (2001, p. 98), de $1,84 \text{ W/m K}$ y de $0,872 \text{ W/m K}$, respectivamente, estos materiales no cumplen con los valores máximos de transmitancia térmica máxima permisible, pues con la primera referencia se obtiene una transmitancia térmica de $2,58 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ y de $2,44 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, y con la segunda referencia, una de $2,62 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ y de $2,39 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, respectivamente.

Pese a lo anterior, y a que se reconoce en la memoria colectiva de los habitantes de la región el hecho de que el sillar funcionaba bien térmicamente con el clima, el desconocimiento de sus cualidades y de la eficiencia térmica que conlleva el uso de ese material han provocado aún más su abandono. Incluso, en el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) (2016), que solicita una transmitancia térmica específica para la región, no se incluye al sillar en los materiales enlistados.

Los estudios del sillar o ignimbrita, por lo general, se han enfocado en conocer y analizar las propiedades de resistencia mecánica; especialmente, en la zona de Arequipa, debido a que esta se ubica en la región de mayor actividad sísmica del Perú (Hernando, 2001, p. 16).

Otros estudios del sillar realizados por parte del Instituto Nacional de Investigación y Normalización de Vivienda del Perú (ININVI) se enfocan exclusivamente en sus propiedades físicas, mecánicas y químicas (Llanque, 2000, p. 65), y dejan de lado sus propiedades térmicas.

Fue hasta 1980 cuando Daniel Meilán señalaba en la Universidad Nacional de Salta, Argentina, que las características del sillar (ignimbritas) tenían una serie de propiedades físicas que los hacían útiles en construcción, por cuanto eran livianos y fáciles de manejar tanto para su transporte como para su colocación. Incluso, comenta que, por su estructura interna, son un aislante natural de la temperatura. El mismo Meilán comenta que la ignimbrita o sillar tiene propiedades acústicas que impiden o disminuyen la transmisión de ruidos entre los distintos ambientes y el exterior, además de ser ignífugas, con lo cual no se ven afectadas por el fuego o un incendio (Alonso, 2016).

Por su estructura interna, al sillar en Arequipa se lo ha considerado un aislante natural de la temperatura. Incluso, en un estudio de conductividad y transmitancia térmica de una muestra de sillar blanco se establece lo siguiente: “(...) podemos establecer comparativamente con la k del Ladrillo común ($k = 0.72 \text{ W/m K}$). Mientras que la k del Sillar es de (0.46 W/m K), esto nos demuestra que el Sillar es un material aislante” (Llanque, 2000, p. 140).



Metodología

En este apartado se describen: diseño de investigación, objeto de estudio, simulador térmico y condiciones de simulación térmica.

La investigación se aplicó en modelos en campo, siguiendo un esquema metodológico de monitoreo experimental, con análisis de causa-efecto, por medio de simulación, que hace énfasis en el uso de modelos y analogías (Groat & Wang, 2002).

Monitoreo térmico de modelos de campo

El monitoreo térmico en campo se realizó en la temporada de verano del 1 al 10 de febrero de 2017 y en la temporada de invierno del 20 al 30 de junio de 2017. Se monitorearon durante ese tiempo 6 módulos en verano y 8 en invierno, construidos de 1,00 m de alto por 1,00 m de ancho y de 1,00 m de largo, con la misma orientación (figura 2).

La cubierta y el piso de los módulos se aislaron con una placa de tecnopor de 2" de espesor (poliuretano expandido de 15 kg/m³ de densidad, 0,04W/m k de conductividad y 1400 J/kg K de calor específico) (figuras 3 y 4). La única diferencia entre los módulos fue el material de los muros de la envolvente (figuras 5 y 6).

Los materiales de los módulos a evaluar durante la temporada de verano fueron los siguientes (figuras 5 y 6):

1. Sillar canto (espesor: 0,19 m)
2. Adobe oeste (espesor: 0,20 m)
3. Bloqueta 1 (espesor: 0,14 m)
4. Ladrillo cabeza (espesor: 0,24 m)
5. Sillar canto 1b (espesor: 0,19 m)
6. Sillar soga (espesor: 0,30 m)

Los materiales de los módulos por evaluar durante la temporada de invierno fueron los siguientes (figuras 5 y 6):

1. Sillar canto (espesor: 0,19 m)
2. Sillar soga (espesor: 0,30 m)
3. Adobe este (espesor: 0,20 m)
4. Adobe oeste (espesor: 0,20 m)



Figura 5. Módulos de bloqueta y de sillar.

Fuente: elaboración propia (2017).

Figura 6. Módulos de sillar, de ladrillo y de adobe.

Fuente: elaboración propia (2017).

Figura 7. Instalación de sensores tipo Hobo.

Fuente: elaboración propia (2017).

5. Bloqueta 1 (espesor: 0,14 m)
6. Bloqueta 2 (espesor: 0,14 m)
7. Ladrillo cabeza (espesor: 0,24 m)
8. Ladrillo soga (espesor: 0,14 m)

En el interior de cada módulo se instalaron a la mitad del espacio dos sensores tipo Hobo U12-02 de la marca ONSET². Uno de los sensores, para registrar la temperatura del aire y la humedad relativa; el otro, para registrar, mediante un cable termopar, la temperatura del muro sur. En el exterior se instaló un sensor tipo Hobo H08 de la misma marca, para registrar la temperatura del aire y humedad relativa. Los sensores se programaron para registrar datos a cada diez minutos en invierno, y a cada quince minutos, en verano (figura 7).

Ninguno de los módulos tiene en su envolvente aberturas o partes transparentes, por lo que su ganancia o su pérdida de calor son exclusivamente por los muros expuestos al exterior.

² Un sensor tipo Hobo es un registrador de datos de temperatura y humedad. Se eligió la marca ONSET por ser un sensor Clase I, compacto, de dimensiones reducidas, económico y de gran precisión, y porque cumple con los requisitos de la ISO 7726:1998

Cálculo de la zona de confort

Para fines comparativos del desempeño térmico, se calculó la temperatura neutral de las temporadas de invierno y de verano de Arequipa con el promedio de la temperatura exterior de los días de monitoreo, mediante el método adaptativo propuesto por ANSI/ASHRAE 55-2010 (2010). Para definir los rangos superior e inferior de la zona de confort, se determinó utilizar la amplitud de +/- 2,5 °C, como sugiere Szokolay (2008).

$$T_n = 17,8 + 0,31(T)$$

Donde:

T_n = temperatura neutral

17,8 = temperatura de núcleo interno

0,31 = Clo

T = temperatura del aire promedio

De acuerdo con este procedimiento, los límites de la zona de confort para la temporada de verano son de 26,03 °C para el límite superior, y de 21,03 °C, para el inferior, con una temperatura neutral de 23,53 °C. Para la temporada de invierno, el límite superior es de 25,35 °C, y el inferior, de 20,35 °C, con una temperatura neutral de 20,85 °C.

Simulación térmica

La simulación térmica se realizó durante los mismos períodos que los del monitoreo de campo, a fin de correlacionar los resultados para su validación y para obtener los consumos energéticos esperados de cada uno de ellos.

Se utilizó el simulador térmico DesignBuilder 4.7. Este programa proporciona datos del consumo de energía, de las emisiones de carbono, de las condiciones de confort, de las temperaturas máximas y mínimas de los espacios y de la estimación del tamaño de equipo de los componentes de HVAC (DesignBuilder, 2010).

DesignBuilder tiene como código fuente Energy Plus 8.0 para la simulación dinámica. Los resultados incluyen flujos de calor por: conducción, radiación solar directa, infiltración y ventilación; además, cargas térmicas internas y costos por climatización, entre otras variables (García, et al., 2011).

Consideraciones de simulación térmica:

- a) Clima: como el software de DesignBuilder no permite ingresar datos de simulación climática medidos, se generó un archivo meteorológico de Arequipa Perú, con el programa Meteonorm. El método de estimación de Meteonorm requiere que se especifique una localización particular para la cual se requieran datos meteorológicos, y presenta los datos en una estructura deseada y formato requerido, tales como: EPW, TMY2 o DOE, entre otros.
- b) Periodo de análisis: se realizó un análisis horario en las dos temporadas climáticas determinadas: verano (de diciembre a marzo) e invierno (de abril a octubre).
- c) Cargas internas: no se consideraron.
- d) Infiltración: se consideró una tasa de renovación de 0,70 renovaciones por hora.
- e) Ventilación natural: no se consideró.
- f) Cerramientos: los valores de conductividad térmica, calor específico y conductividad de los materiales de construcción de los módulos se obtuvieron del Anexo 3 del Reglamento Nacional de Edificación (2016), como se muestra en la tabla 1.

Para obtener los valores de conductividad térmica, densidad y calor específico del sillar, se enviaron tres muestras de sillar blanco a dos laboratorios en México, para su análisis:

- 1) El laboratorio Novidesa de la Petroquímica IDESA, ubicado en Tlaxcala, México, está acreditado a partir de 2011-04-27 por la Entidad Mexicana de Acreditación, A. C. (EMA), con número de acreditación C-0061-008/11.

Tabla 1. Valores térmicos de los materiales de los módulos.

Fuente: elaboración propia (2017).

	Material	Densidad Kg/m³	K = Conductividad W/m °C	Resistividad m °C/W	Cp = Calor específico J/Kg °C	Fuente
1	Sillar	1306,96*	0,16	0,14	6,10	463,75**
2	Adobe	1100-1800	0,90	0,77	1,11	920*
3	Bloqueta de concreto	2300,00	0,50	0,43	2,00	1000,00
4	Bloque de arcilla; ladrillo corriente	1700,00	0,84	0,72	1,19	800,00
5	Poliestireno expandido (densidad media)	30,00	0,03	0,03	30,30	1700,00

La acreditación fue otorgada bajo la norma NMX-Ec-17025-IMNC-2006 y la ISO 17025:2005.

La determinación de la densidad del sillar se hizo mediante el método de prueba MP-950, que está referenciado a la NMX-C-126-ON-NCCE-2010. Industria de la Construcción-Materiales Termoaislantes en forma de bloque o placa- determinación de las Dimensiones y Densidad. El acondicionamiento de los especímenes fue de 24 horas, a 105 °C.

La determinación de la transmisión térmica está referenciada a la NMX-C-181-ONNC-CE-2010. Industria de la Construcción-Materiales termoaislantes-Determinación de la Transmisión Térmica en Estado Estacionario (Medidor del Flujo del Calor). El equipo utilizado para ello fue un Medidor de Flujo de Calor HFM-436/3/1 ER con fecha última de calibración: 2017-02-15.

- 2) El Centro de Investigación de Materiales Avanzados de Chihuahua, México (CIMAV) hizo el análisis de calor específico por el método de prueba estándar para la determinación de la capacidad calorífica (C_p) mediante el análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC). Dicho análisis consiste en someter la muestra a un calentamiento programado registrando las reacciones endo/exotérmicas que van ocurriendo. La determinación se llevó a cabo en un calorímetro diferencial de la marca TA Instruments, modelo Q 200, en las siguientes condiciones: rampa de calentamiento, flujo de nitrógeno de 50 cm³/min utilizando el método modulado. El equipo se calibró con estándares metálicos de indio y zinc, de acuerdo con la norma ASTM D 3418.

Resultados

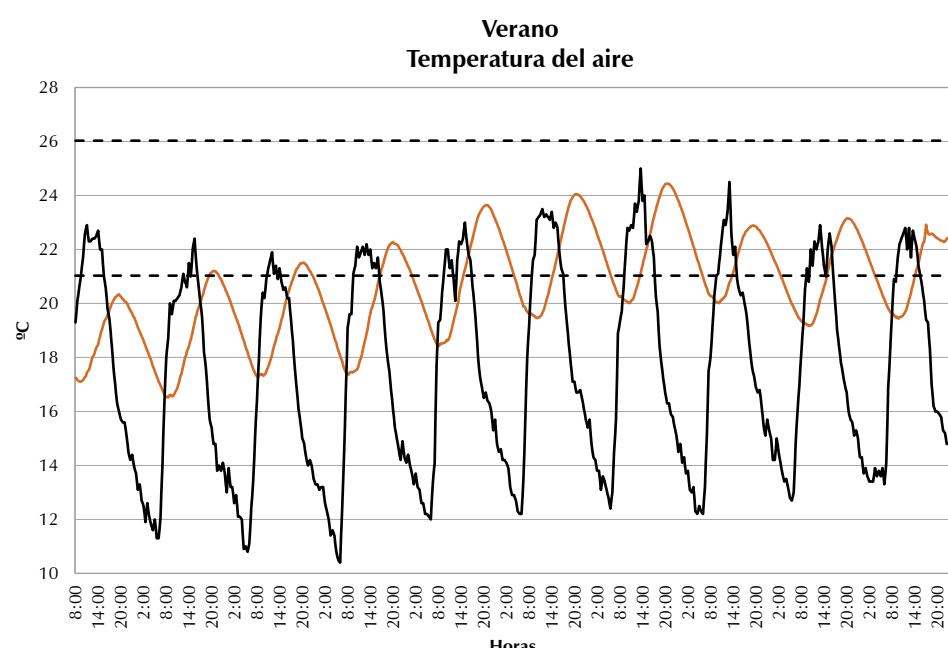
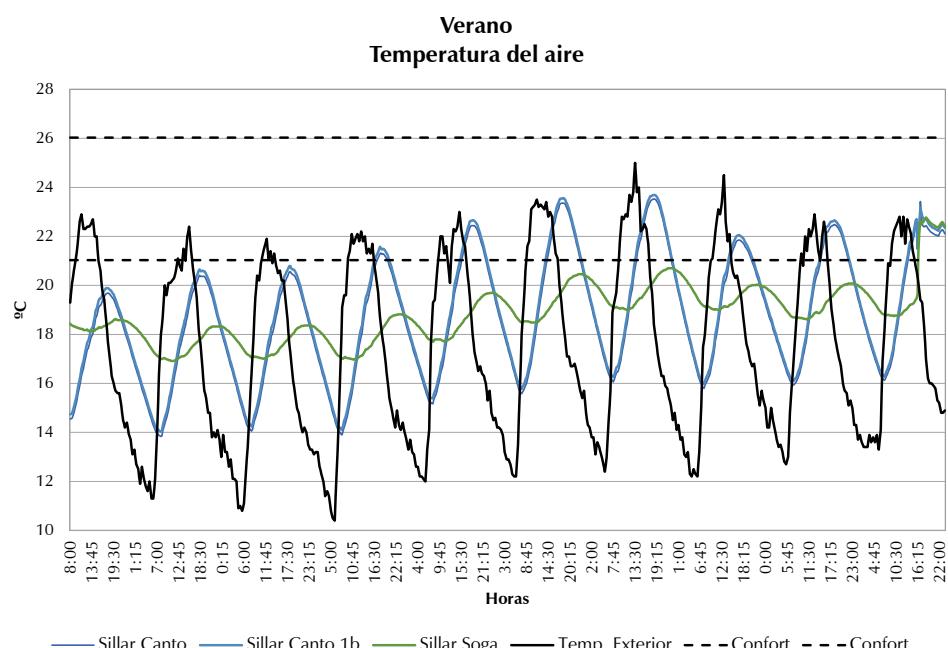
Monitoreo de campo

Temporada de verano

El monitoreo de campo de la temporada de verano se realizó del 1 al 10 de febrero del 2017. Para esa temporada, los datos de temperatura exterior se obtuvieron del centro meteorológico La Pampilla (2017). La temperatura exterior máxima registrada en dicha temporada fue de 25 °C; la promedio, de 17,50 °C, y la mínima, de 10,40 °C, con una oscilación térmica promedio de 14,60 °C.

1. Sillar: canto, canto 1b y soga

El desempeño térmico del sillar canto y el sillar canto 1b es exactamente el mismo. Los resultados nos indican una oscilación térmica entre el día y la noche de 9,69 °C. El sillar de este espesor amortigua en el 33,63 % la temperatura del aire exterior; es decir, 4,91 °C menos. La temperatura en el interior del módulo permanece en el 17 % dentro de la zona de confort.



fort, producto de las temperaturas más altas que se presentan durante el día (figura 8).

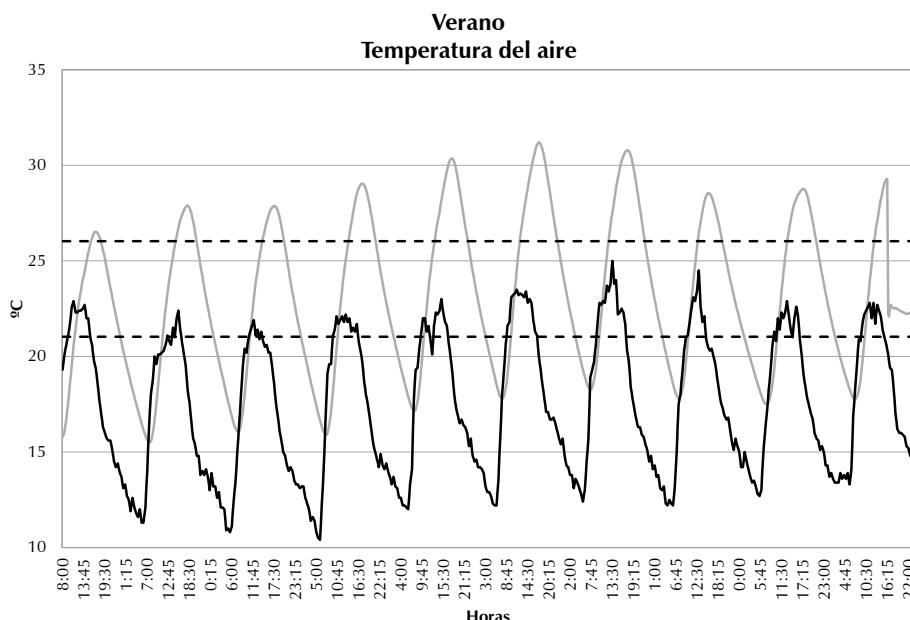
El resultado del desempeño térmico del sillar soga presenta una oscilación térmica entre el día y la noche de 5,86 °C. El sillar de este espesor amortigua en el 59,87 % la temperatura del aire exterior; es decir, 8,74 °C menos. Aunque la temperatura interior del módulo permanece el 0,00 % dentro de la zona de confort, la amplitud de la oscilación térmica nos indica que ese material estabiliza la temperatura interior, lo cual es conveniente para la sensación de confort (figura 8).

2. Adobe oeste

El desempeño térmico del adobe oeste nos indica una oscilación térmica entre el día y la noche de 7,93 °C; es decir, el adobe de este espesor amortigua en el 45,68 % la temperatura del aire exterior, lo cual equivale a 6,67 °C menos. La temperatura en el interior del módulo permanece en el 45 % dentro de la zona de confort, producto de las temperaturas más altas que se presentan durante el día y debido a que la temperatura del interior del módulo se estabiliza (figura 9).

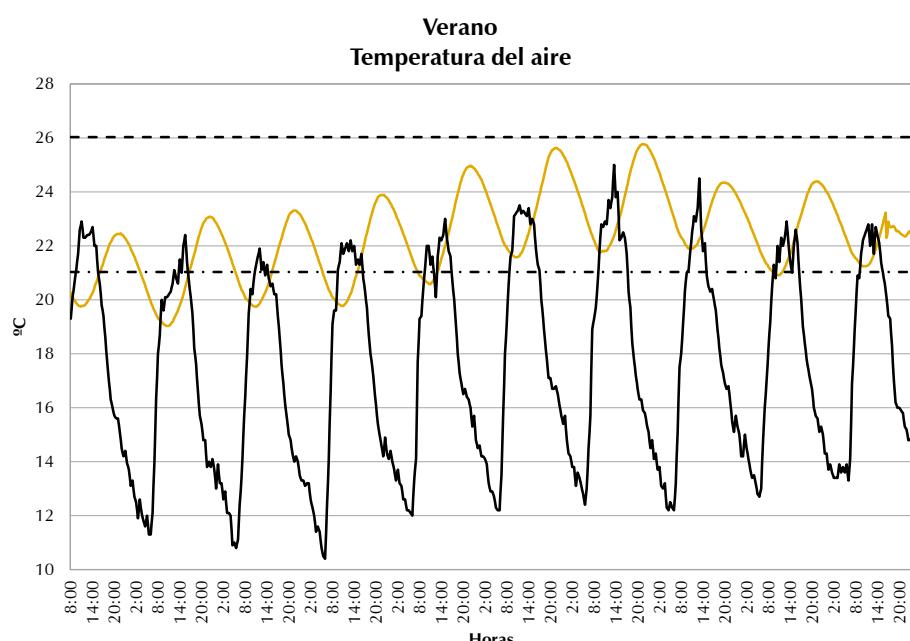
Figura 8. Resultados de la temperatura del aire del sillar. Temporada de verano.
Fuente: elaboración propia (2017).

Figura 9. Resultados de la temperatura del aire del adobe. Temporada de verano.
Fuente: elaboración propia (2017).



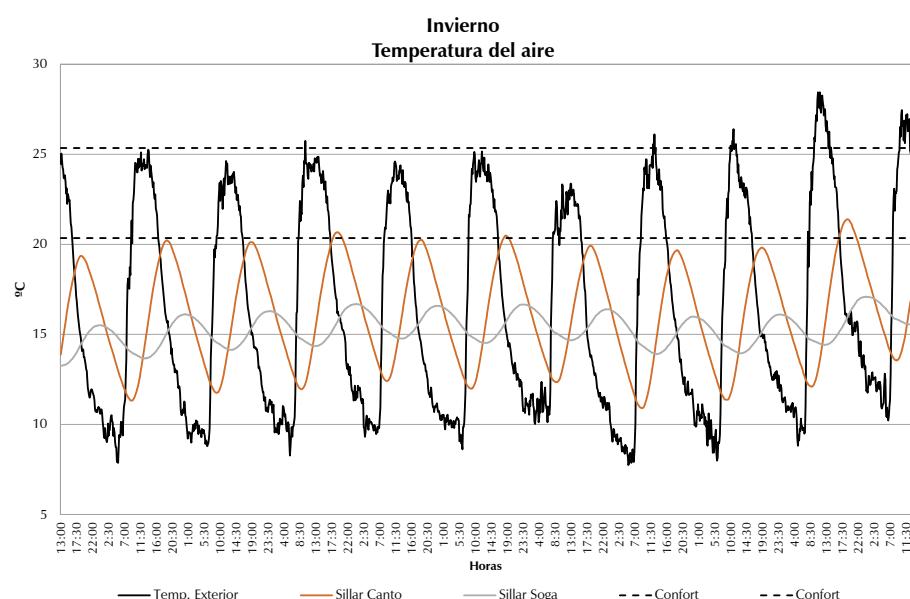
Ⓐ Figura 10. Resultados de la temperatura del aire interior de la bloqueta. Temporada de verano.

Fuente: elaboración propia (2017).



Ⓐ Figura 11. Resultados de la temperatura del aire del ladrillo. Temporada de verano.

Fuente: elaboración propia (2017).



Ⓐ Figura 12. Resultados de la temperatura del aire del Sillar. Temporada de invierno.

Fuente: elaboración propia (2017).

3. Bloqueta 1

El desempeño térmico de la bloqueta 1 nos indica una oscilación térmica entre el día y la noche de 15,7 °C, la cual es incluso mayor que la de la temperatura exterior. Dicho comportamiento es inadecuado para el clima de Arequipa, pues las condiciones frías del exterior estarán en el interior al mismo tiempo. En este caso, el 40% del tiempo se encuentra la temperatura del interior del módulo dentro de la zona de confort, producto del recorrido de la temperatura en su continuo descenso o ascenso durante el día o la noche (figura 10).

4. Ladrillo cabeza

El desempeño térmico del ladrillo cabeza nos indica una oscilación térmica entre el día y la noche de 6,74 °C. Es decir, el ladrillo de este espesor amortigua en el 53,84% la temperatura del aire exterior; o sea, 7,86 °C menos. La temperatura en el interior del módulo permanece en el 78% dentro de la zona de confort, producto de las temperaturas más altas que se presentan durante el día y de la baja amplitud térmica del material (figura 11).

Temporada de invierno

El monitoreo de campo de la temporada de invierno se realizó del 20 al 30 de junio del 2017. La temperatura exterior máxima registrada en esta temporada fue de 28,40 °C; la promedio, de 16,26 °C, y la mínima, de 7,75 °C, con una oscilación térmica promedio de 20,70 °C.

1. Sillar: canto y soga

El desempeño térmico del sillar canto nos indica una oscilación térmica entre el día y la noche de 10,48 °C. El sillar de este espesor amortigua en el 49,37% la temperatura del aire exterior; es decir, 10,22 °C menos. La temperatura en el interior del módulo permanece en el 1,00% dentro de la zona de confort; sin embargo, aunque la temperatura permanece más estable por la amplitud térmica durante el día, las temperaturas interiores siempre se encuentran por debajo de la zona de confort (figura 12).

El desempeño térmico del sillar soga nos indica una oscilación térmica entre el día y la noche de 3,85 °C. Es decir, el sillar de este espesor amortigua en el 81,40% la temperatura del aire exterior; o sea, 16,85 °C menos. La temperatura en el interior del módulo nunca permanece dentro de la zona de confort; sin embargo, al presentar una amplitud térmica menor estabiliza la temperatura interior, lo cual es deseable a la sensación de confort humano. Por tal razón, el sillar soga solo requiere una fuente de calor para que en invierno funcione de una manera adecuada para el clima de Arequipa (figura 12).

2. Adobe este y oeste

El desempeño térmico del adobe este y oeste es igual en cada caso. Los resultados nos indican una oscilación térmica entre el día y la noche de 6,41 °C. Es decir, el adobe de este espesor amortigua en el 69,03% la temperatura del aire exterior; o sea, 14,29 °C menos. La temperatura en el interior del módulo permanece en el 2% dentro de la zona de confort, lo cual nos indica que su comportamiento térmico es estable y adecuado para el clima de Arequipa, lo que puede ser aún mejor si se cuenta con una ganancia de calor (figura 13).

3. Bloqueta 1 y 2

El desempeño térmico de las bloquetas 1 y 2 es muy similar en cada caso. Los resultados nos indican una oscilación térmica entre el día y la noche de 18,44 °C y 17,50 °C, respectivamente; ambas, muy cercanas al comportamiento de la temperatura exterior. La bloqueta 1 tiene un amortiguamiento de la temperatura exterior del 10,92%, y la bloqueta 2, uno del 15,46%; o sea, 2,30 °C y 3,20 °C menos, respectivamente. Esto quiere decir que la temperatura del aire en ese módulo actúa prácticamente de la misma manera como lo hace en el exterior, lo cual es inadecuado para el clima de Arequipa, pues las condiciones frías del exterior estarán en el interior al mismo tiempo. En ambos casos, el 45% del tiempo se encuentran dentro de la zona de confort, producto del recorrido de la temperatura en su continuo descenso o ascenso durante el día o la noche (figura 14).

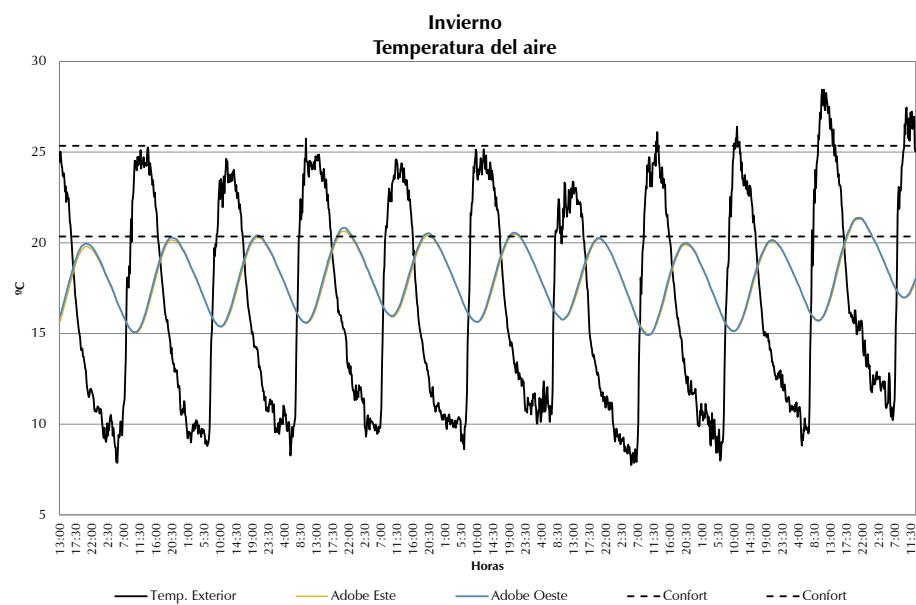
4. Ladrillo: cabeza y soga

El desempeño térmico del ladrillo cabeza nos indica una oscilación térmica entre el día y la noche de 5,38 °C. Es decir, el ladrillo de este espesor amortigua en el 74,00% la temperatura del aire exterior; o sea, 15,32 °C menos. La temperatura en el interior del módulo nunca permanece dentro de la zona de confort, lo cual indica que su comportamiento térmico es estable, y ello es conveniente para la sensación térmica de confort (figura 15).

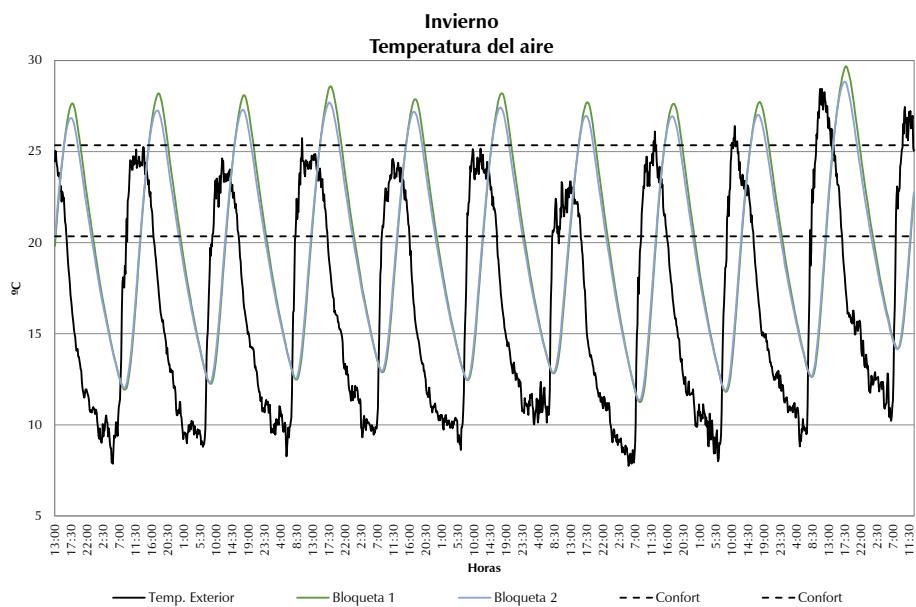
El desempeño térmico del ladrillo soga nos indica una oscilación térmica entre el día y la noche de 13,99 °C. Es decir, el Ladrillo de este espesor amortigua en el 32,41% la temperatura del aire exterior; o sea, 6,71 °C menos. La temperatura al interior del módulo permanece el 30% dentro de la zona de confort, como producto de que las temperaturas interiores alcanzadas son iguales a las temperaturas exteriores más altas durante el día (figura 15).

Simulación térmica

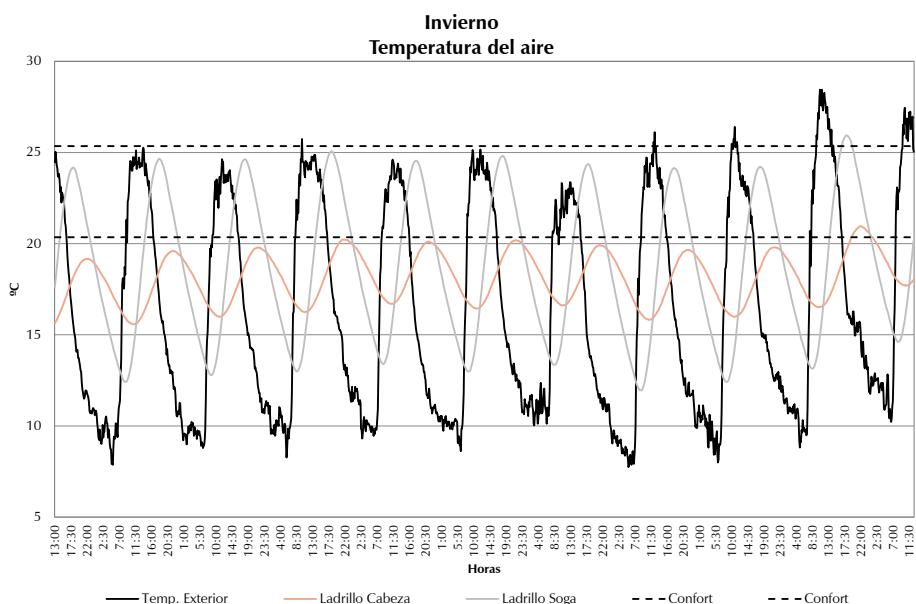
Al obtener los resultados del desempeño térmico de los módulos en el monitoreo de campo en ambas temporadas, se procedió a hacer simulaciones térmicas, a fin de poder evaluar el consumo energético de los módulos para alcanzar



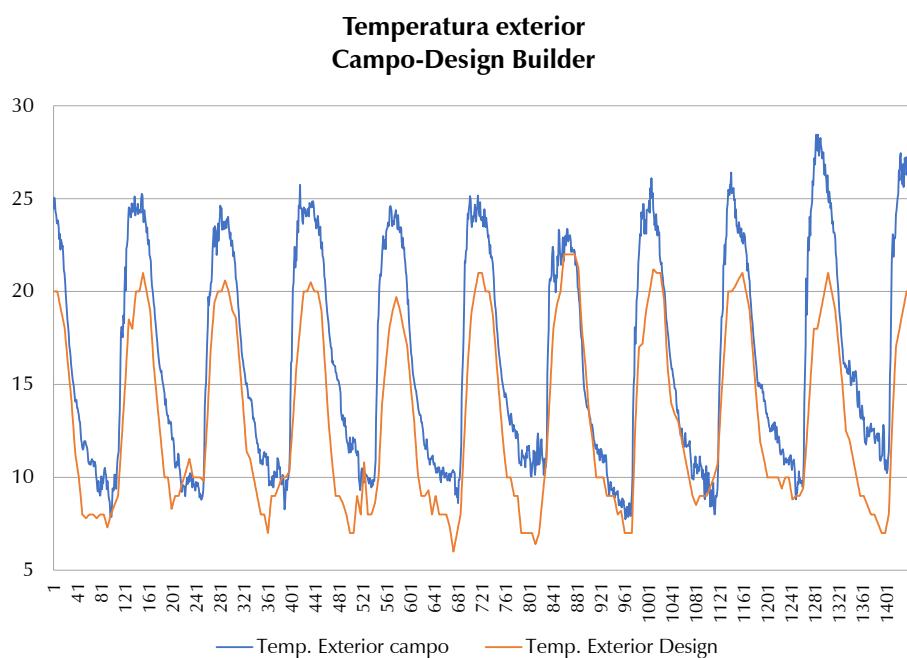
Ⓐ Figura 13. Resultados de la temperatura del aire del adobe. Temporada de invierno.
Fuente: elaboración propia (2017).



Ⓐ Figura 14. Resultados de la temperatura del aire de la bloqueta. Temporada de invierno.
Fuente: elaboración propia (2017).

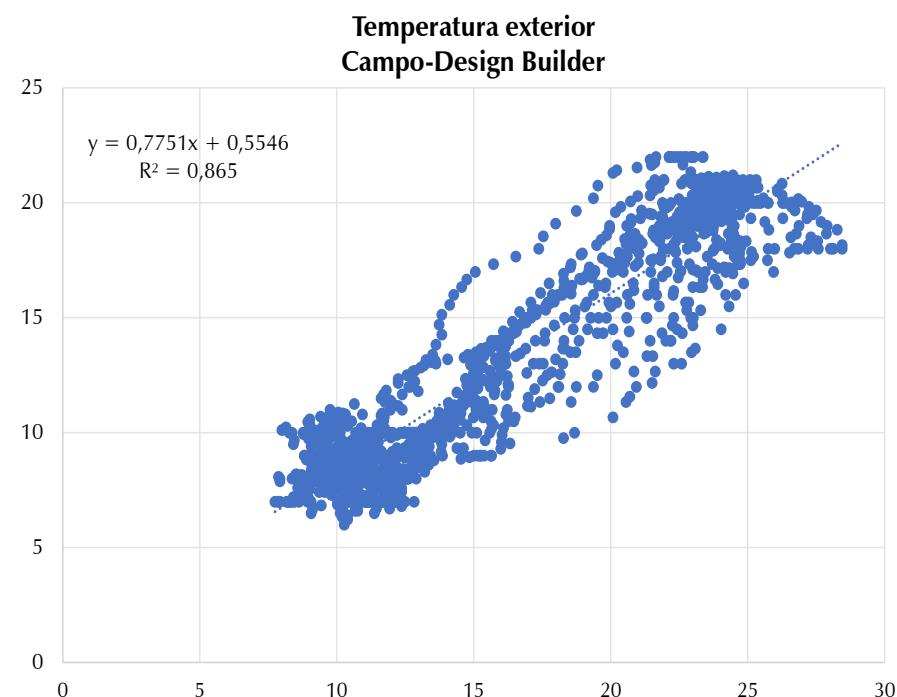


Ⓐ Figura 15. Resultados de la temperatura del aire del ladrillo. Temporada de invierno.
Fuente: elaboración propia (2017).



Ⓐ Figura 16. Comparación de resultados de campo y simulación térmica de la temperatura exterior. Temporada de invierno.

Fuente: elaboración propia (2017).



Ⓐ Figura 17. Correlación de resultados en escala de Pearson de la simulación térmica y el registro de campo de la temperatura exterior. Temporada de invierno.

Fuente: elaboración propia (2017).

Ⓑ Tabla 3. Consumo energético por material. Temporada de invierno.
Fuente: elaboración propia (2017).

Bloqueta 1		Adobe este y oeste		Ladrillo soga		Ladrillo cabeza		Sillar canto	Sillar soga
Calor (gas)	Enfriamiento (electricidad)	Calor (gas)	Enfriamiento (electricidad)	Calor (gas)	Enfriamiento (electricidad)	Calor (gas)	Calor (gas)	Calor (gas)	
kw	kw	kw	kw	kw	kw	kw	kw	kw	
27,88	1,20	21,73	0,47	21,14	0,54	8,20	6,45	2,67	

Ⓑ Tabla 4. Consumo energético por material. Temporada de invierno
Fuente: elaboración propia (2017).

Bloqueta 1		Adobe		Ladrillo soga		Sillar canto	Ladrillo cabeza	Sillar soga
Calor (gas)	Enfriamiento (electricidad)	Calor (gas)	Enfriamiento (electricidad)	Calor (gas)	Enfriamiento (electricidad)	Calor (gas)	Calor (gas)	Calor (gas)
kw	kw	kw	kw	kw	kw	kw	kw	kw
9,14	0,43	6,67	0,11	4,72	0,15	1,37	0,67	0,03

temperaturas dentro de la zona de confort. Para ello, lo primero que se hizo fue comparar las temperaturas exteriores registradas en campo con las que el software de DesignBuilder establece (Herrera, 2017, p. 23). Se determinó hacerlo solo en la temporada de invierno, pues la uniformidad del clima a lo largo del año no representa variaciones importantes para efectos de simulación.

En esta temporada se puede observar que las temperaturas simuladas son menores que las registradas en campo. En promedio, las diferencias de temperaturas son las siguientes: máximas de 6,4 °C, mínimas de 3,10 °C y promedio de 1,75 °C (figura 16).

Para corroborar si es factible utilizar los resultados de la figura 16 en las simulaciones, se procedió a hacer una correlación de Pearson de los datos registrados en el monitoreo de campo con los obtenidos, mediante simulación con DesignBuilder. El resultado de la correlación nos indica una $R^2 = 0,865$; esto significa una $R = 0,930$, lo cual en la escala de Pearson se considera una correlación positiva muy alta (figura 17).

Temperatura	R ²	R
Exterior	0,865	0,930
Sillar canto	0,857	0,926
Sillar soga	0,824	0,908
Adobe este y oeste	0,882	0,939
Ladrillo cabeza	0,833	0,913
Ladrillo soga	0,784	0,885
Bloqueta 1 y 2	0,840	0,917

Ⓐ Tabla 2. Valores de correlación de valores registrados en campo y de simulación.

Fuente: elaboración propia (2017).

Las correlaciones de los datos de temperatura del aire interior registrados durante el monitoreo de campo con los resultados de la simulación térmica con el software DesignBuilder del sillar canto y soga; del adobe este y oeste; del ladrillo cabeza y soga, y de las bloquetas 1 y 2 son los que se muestran en la tabla 2.

La correlación positiva tan alta en todos los casos nos demuestra que es factible utilizar la simulación térmica, por medio del software DesignBuilder, para cuantificar el consumo energético requerido para que la temperatura del aire en el interior de cada uno de los módulos permanezca dentro de la zona de confort.

Para la simulación del consumo energético de cada uno de los módulos por necesidad de calentamiento se consideró la capacidad calorífica del gas como combustible, en tanto que para la necesidad de enfriamiento se consideró la energía eléctrica.

Los resultados de la temporada de invierno nos indican que el módulo que requiere mayor consumo de energía para calentamiento es el de la bloqueta 1; le siguen el de adobe y el de ladrillo soga. Los módulos más eficientes en este rubro, en su orden, son los de sillar soga, sillar canto y ladrillo cabeza (tabla 3 y figura 18).

Para enfriamiento, el módulo que requiere mayor consumo de energía eléctrica es el de la bloqueta 1; le siguen el de ladrillo soga y, por último, el de adobe. Los módulos de sillar soga, de sillar canto y de ladrillo cabeza no tienen demanda de consumo por enfriamiento (tabla 3 y figura 18).

Los resultados de la simulación del consumo energético en la temporada de verano nos indican que el módulo que requiere mayor consumo energético para calentamiento es el de bloqueta 1; le siguen el de adobe y el de ladrillo soga. Los módulos más eficientes en este rubro son el de sillar soga, ladrillo cabeza y sillar canto (tabla 4 y figura 19).

Para efectos del enfriamiento, el módulo de mayor consumo energético es el de la bloqueta 1; le siguen el de ladrillo soga y, por último, el de

adobe. Los módulos de sillar soga, ladrillo cabeza y sillar canto no tienen demanda de consumo por enfriamiento (tabla 4 y figura 19).

Para el cálculo del ahorro en el consumo energético de electricidad por necesidad de enfriamiento y para efectos de comparación, se consideró la bloqueta 1, que es el material más ineficiente térmicamente, como el del 0% de ahorro. Los materiales de sillar canto, sillar soga y ladrillo cabeza son los más eficientes, pues no tienen consumo de electricidad, por lo que su ahorro es del 100%; le siguen el adobe, con el 61,57%, y el ladrillo soga, con el 58,09% (figura 20).

Figura 18. Resultados del consumo energético por material. Temporada de invierno.
Fuente: elaboración propia (2017)

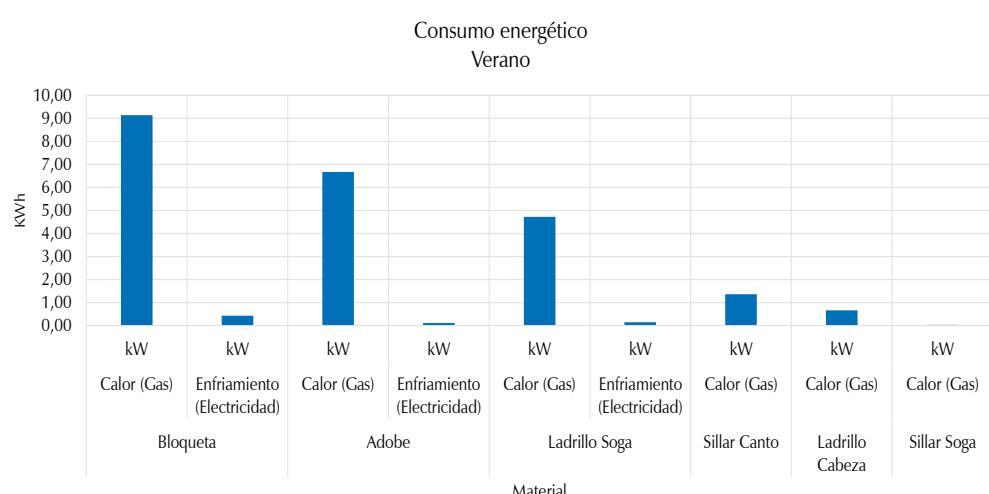
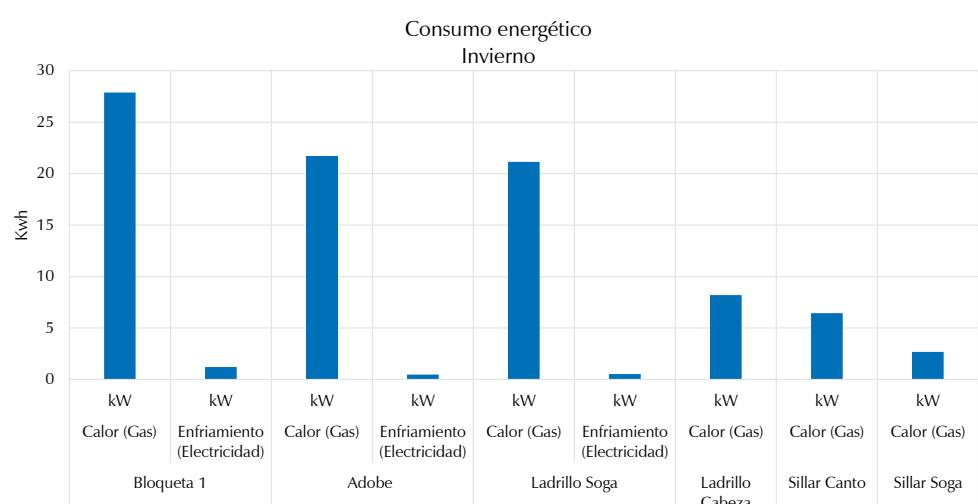


Figura 19. Resultados del consumo energético por material. Temporada de verano.
Fuente: elaboración propia (2017).

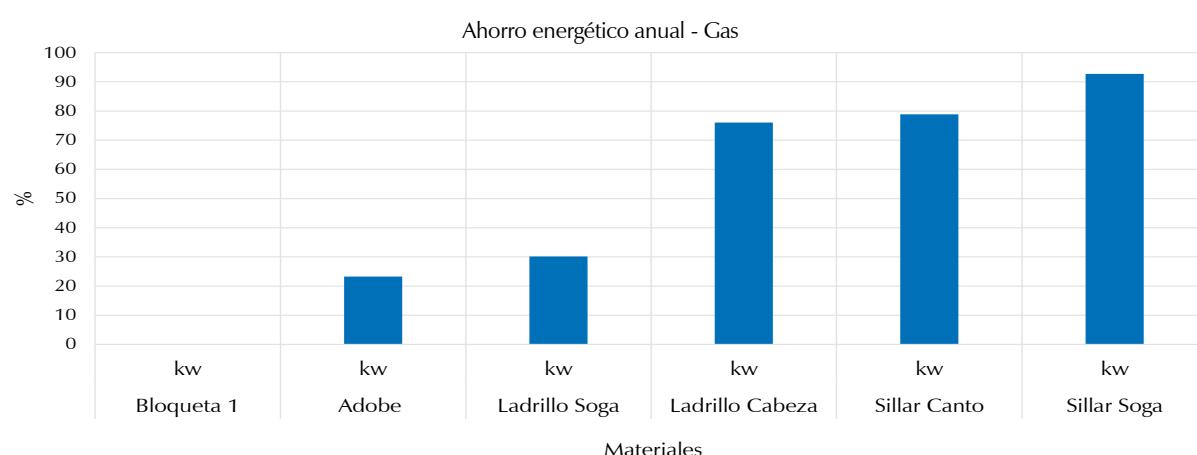
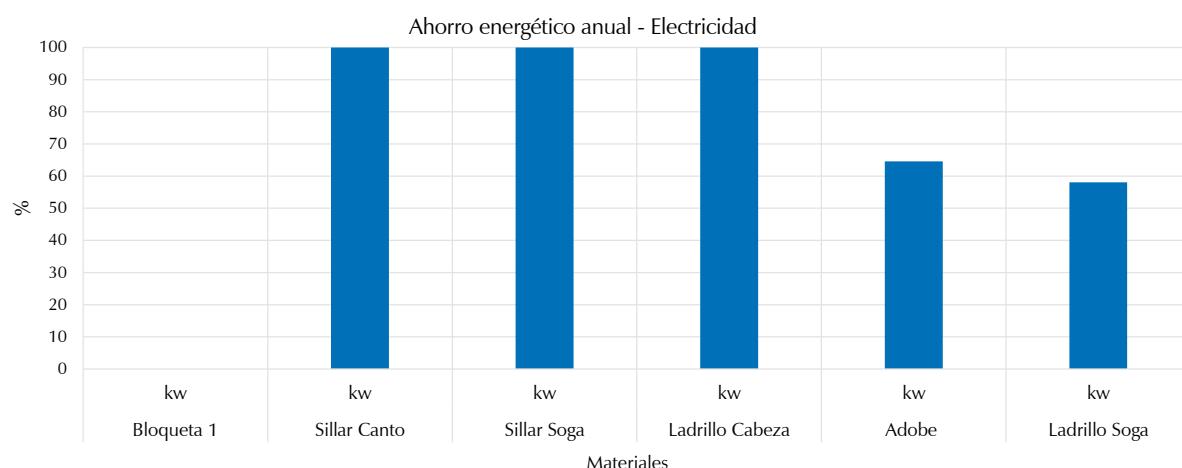


Figura 20. Resultados del ahorro energético de electricidad anual.
Fuente: elaboración propia (2017).

Figura 21. Resultados de ahorro energético de gas anual.
Fuente: elaboración propia (2017).



	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano		Invierno	
	Oscilación (°C)	Amortiguamiento (%)	Confort (%)		Consumo energético gas KW	Consumo energético electricidad KW	Consumo energético gas KW	Consumo energético electricidad KW		
Temp. exterior	14,60	20,70	X	X	26,00	28,40	X	X	X	X
Sillar canto y canto 1b	9,69	10,48	33,63	49,37	17,00	1,00	1,37	0,00	6,45	0,00
Sillar soga	5,86	3,85	59,87	81,40	0,00	0,00	0,03	0,00	2,67	0,00
Adobe este y oeste	7,93	6,41	45,68	69,03	45,00	2,00	6,67	0,11	21,73	0,47
Bloqueta 1	15,70	18,44	X	10,92	40,00	45,00	9,14	0,43	27,88	1,20
Bloqueta 2	X	17,50	X	15,49	X	45,00	X	X	27,88	1,20
Ladrillo cabeza	6,74	5,38	53,84	74,00	78,00	0,00	0,67	0,00	8,20	0,00
Ladrillo soga	X	13,99	X	32,41	X	30,00	X	X	21,14	0,54

Tabla 5. Resultados del monitoreo de campo y la simulación térmica de los materiales de los módulos.
Fuente: elaboración propia (2017).

Para el cálculo del ahorro en el consumo energético de gas por necesidad de calentamiento y para efectos de comparación, se consideró la bloqueta 1, que es el material más ineficiente térmicamente, como el del 0 % de ahorro. El material con el mayor porcentaje de ahorro es el sillar soga, con el 92,69%; le siguen el sillar canto, con el 78,89%, y el ladrillo cabeza, con el 76,05%. Muy por debajo, siguen el ladrillo soga, con el 30,14%, y el adobe, con el 23,29% (figura 21).

Discusión

De acuerdo con los resultados del monitoreo de campo, el mejor desempeño térmico en ambas temporadas lo tiene el módulo con el material de sillar soga, por cuanto es el que tiene la menor oscilación térmica y el menor amortiguamiento, en comparación con el resto de los materiales analizados. Si bien el sillar soga nunca se encuentra dentro de la zona de confort, el hecho de que presente una amplitud térmica significativamente menor que la del resto de los materiales es deseable para la sensación de confort humano. Además, este material es el que menor consumo energético tiene en ambas temporadas climáticas (tabla 5).

Es importante destacar que, de todos los materiales analizados, el sillar soga es el que mayor espesor tiene, por lo cual su resistencia térmica

al paso de calor es mayor, y, por lo tanto, tiene el mejor desempeño térmico (tabla 5).

El segundo material de mejor desempeño térmico es el sillar canto, pues su consumo energético se encuentra solo por debajo del sillar soga. Si bien, en términos de oscilación térmica y amortiguamiento, el ladrillo cabeza presenta un mejor desempeño térmico, la diferencia de 0,10 m en el espesor de ambos materiales nos indica cualidades térmicas más adecuadas para el clima de Arequipa por parte del sillar canto (tabla 5).

El tercer material con mejor desempeño térmico es el adobe este y oeste, pues su oscilación térmica y su amortiguamiento son mayores, en comparación con el sillar canto, el sillar soga y el ladrillo cabeza, pero menor que el resto de los materiales. En cuanto al consumo energético, también presenta el tercer mejor resultado; principalmente, en el consumo energético de electricidad en la temporada de invierno (tabla 5).

El material con el peor desempeño térmico es la bloqueta 1 y 2, por cuanto es la que tiene la mayor oscilación térmica, incluso mayor que la de la temperatura exterior, y su amortiguamiento es el más bajo, comparado con el resto de los materiales analizados. En términos de consumo energético, las bloquetas 1 y 2 presentan el mayor consumo en ambas temporadas, en comparación con el resto de los materiales (tabla 5).

Si bien este material es uno de los que en el mayor porcentaje de tiempo se encuentran dentro de la zona de confort, debido a que en el recorrido sinusoide diario de las temperaturas estas son muy similares al de la temperatura exterior, en términos de sensación térmica no es adecuado (tabla 5).

Conclusiones

El sillar, en su colocación en soga y canto, es el de mejor desempeño térmico, en comparación con el resto de los materiales analizados, aunque no se encuentre dentro de la zona de confort, pues su oscilación térmica y su amortiguamiento permiten que la temperatura del aire en el interior de los módulos permanezca estable durante el mayor tiempo. Además, es el material que menor consumo energético presentó en ambas temporadas, tanto para calentamiento como para enfriamiento.

El espesor, tanto del sillar soga como el de sillar canto, cumple con la transmitancia térmica requerida por el RNE (2016), pues tienen 0,78 W/m² K y 1,49 W/m² K, respectivamente.

El adobe, independientemente de su orientación, tiene un eficiente desempeño térmico en ambas

temporadas, no obstante que su espesor, de 0,20 m, ni apenas es el suficiente, de acuerdo con los valores térmicos de la RNE (2016), pues tiene 2,241 W/m² K, lo cual nos indica que un adobe de mayor espesor mejoraría no solo en valores de transmitancia térmica, sino también, en desempeño térmico, y, por ende, en un menor consumo energético.

El ladrillo soga y el cabeza cumplen satisfactoriamente con lo requerido por el RNE (2016); sin embargo, el mayor espesor del ladrillo cabeza le permite un mejor desempeño térmico y un menor consumo energético.

El desempeño térmico de las bloquetas 1 y 2 fue ineficiente, además de que no cumplen con el requerimiento del RNE (2016). Tal situación nos permite afirmar que este material tiene un alto consumo energético, por lo cual su uso debe ser prudente y apoyado con sistemas de aislamiento que disminuyan su transmitancia térmica y mejoren su desempeño térmico.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de San Agustín, por el apoyo recibido para la elaboración del proyecto de investigación.

Referencias

- Alonso, R. (2016). *Ignimbrita o Sillar: Una roca de construcción ecológica* [Entrada de Blog] Recuperado de: <http://danielsalmoral.com/2016/04/23/ignimbrita-o-sillar-una-roca-de-construccion-ecologica-por-ricardo-alonso/>
- ANSI/ASHRAE Standard 55. (2010). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers, pp. 11-12. 2010.
- Cedeño, V. (2010). Materiales Bioclimáticos. *Revista de Arquitectura* (Bogotá), 12(1), 100-110. Recuperado de: https://editorial.ucatolica.edu.co/ojsucatolica/revistas_ucatolica/index.php/RevArq/issue/view/20
- Cornejo, S., Márquez, K., Avendaño, G. Rodríguez, J., & Carrillo, V. (2018). *Concreto Traslucido y Sillar* (trabajo académico). Huacho, Perú: Universidad Alas Peruanas. Recuperado de: <https://www.studocu.com/es/document/universidad-alas-peruanas/ingenieria-civil/informe/tema-concreto-translucido-y-sillar/2122897/view>
- DesignBuilder. (2010). DesignBuilder EnergyPlus Simulation Documentation: for DesignBuilder v4.7. Recuperado de: <http://www.designbuilder.co.uk/helpv4/>
- Hernando, T. (2001). Catálogo Sísmico del Perú 1471-1982 . Instituto Geofísico del Perú. Recuperado de: https://scts.igp.gob.pe/sites/scts.igp.gob.pe/files/Unidad-Sismologia/PUBLICACIONES/02-monografias/03-Catalogo_Sismico_1471_1982.pdf
- ISO 7726. (1998). Instruments for measuring physical quantities. International Organization for Standardization. Ergonomics of the thermal environment. Recuperado de: <https://www.iso.org/standard/14562.html>
- ISO 17025. (2005). Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Recuperado de: <https://www.icsa.es/laboratorios-analiticos/consultoria-de-laboratorios/norma-iso-17025>
- García, A., Cadena, J., Bojorquez G., Luna, A., & Vázquez, E. (2011). Confort térmico y consumo energético por uso de sistemas constructivos para muros, en Mexicali Baja California. Semana Nacional de Energía Solar Número XXXV. Chihuahua, Chihuahua, México. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/315584401_Confort_Termico_y_Consumo_Energetico_por_uso_de_Sistemas_Constructivos_para_Muros_en_Mexicali_Baja_California
- Groat, L., & Wang, D. (2002). Architectural research methods. New York: Jhon Wiley & Sons.
- Herrera, L. (2017). Evaluación térmica del material isoblock en el clima cálido seco de Ciudad Juárez México. *Revista Habitat Sustentable* (Concepción), 7(2), 18-27. doi: <https://doi.org/10.22320/07190700.2017.02.02>
- Lara Galindo, J. (1988). Ensayos de Albañilería en Sillar. (Trabajo de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú). Recuperado de: http://blog.pucp.edu.pe/blog/wpcontent/uploads/sites/82/2013/04/tesis_lara.pdf
- Llanque, J. (2000). *Arquitectura Bioclimática*. 1^a Ed 1. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín.
- Mapas Temáticos del Perú. (2018). *Mapa Climático del Perú*. (Imagen). Recuperado de: <http://mapaspianosperu.blogspot.com/2011/03/mapa-climatico-del-peru.html>
- NMX-Ec-17025-IMNC-2006. (2006). Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración. Recuperado de: <http://integra.cimav.edu.mx/intranet/data/files/calidad/documentos/externos/NMX-EC-17025-IMNC-2006.pdf>
- NMX-C-126-ONNCCE-2010. (2010). Industria de la Construcción-Materiales termoaislantes en forma de Bloque o Placa-determinación de las dimensiones y Densidad. Recuperado de: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5162160&fecha=06/10/2010
- Reglamento Nacional de Edificaciones. (2016). [Instituto de Control y Gerencia]. Edificaciones, Instalaciones eléctricas. Confort térmico y lumínico con eficiencia energética. 21 de junio de 2006. Recuperado de: <http://www.construccion.org/normas/rne2012/rne2006.htm>
- Science On a Sphere. (2007). Köppen-Geiger Climate Classification. Recuperado de: <https://sos.noaa.gov/datasets/koppen-geiger-climate-classification-2007/>
- Secretaría de Energía. (25 de abril de 2001). Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales. [segunda sección]. DO: [Diario oficial de la Federación]. Recuperado de: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69902.pdf>
- Szokolay, S. V. (2008). *Introduction to architecture science. The basis of sustainable design*. Oxford, U. Elsevier LTD. Recuperado de: <https://es.climate-data.org/america-del-sur/peru/arequipa/arequipa-3078/>

