

SOLUCIONES ALTERNATIVAS PARA REDUCIR EL ESTRÉS TÉRMICO DURANTE LA TARDE EN LA VIVIENDA SOCIAL CON TECHO DE LÁMINAS DE ACERO GALVANIZADO EN EL CLIMA CÁLIDO Y HÚMEDO DE PORTOVIEJO

Por Dr. C. **José Fabián Véliz Párraga*** y Dra. Sc. **Dania González Couret****

*Profesor de la Universidad Técnica de Manabí, Ecuador

E-mail: jfveliz@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-5356-4537>

** Profesora Titular. Universidad Tecnológica de La Habana.

E-mail: daniagcouret@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1406-4588>

Resumen

La lámina de acero galvanizado es un elemento de construcción ampliamente usado en la vivienda social de los países en desarrollo. Desde el punto de vista térmico, es favorable en los climas cálido-húmedos en la noche, pero las personas que permanecen en la vivienda durante la tarde se exponen a condiciones de calor extremas. Este artículo muestra los resultados de investigaciones desarrolladas en Portoviejo, Ecuador, con vistas a proponer soluciones alternativas de bajo costo para reducir la temperatura interior durante la tarde, con recursos locales disponibles.

La investigación se desarrolló en tres etapas; la primera corresponde a un trabajo de campo en 49 cubiertas de láminas de acero galvanizado en viviendas sociales, durante la segunda se realizó un inventario de los recursos disponibles localmente en aras de proponer soluciones alternativas para reducir la temperatura interior, cuyo desempeño fue finalmente monitoreado en módulos experimentales. Los resultados fueron procesados estadísticamente y se realizó un análisis costo-beneficio.

Los habitantes están expuestos diariamente a 8,5 horas de estrés térmico, desde las 10:30 a.m. hasta las 7:00 p.m., el cual puede reducirse mediante las soluciones alternativas propuestas, hasta solo tres horas diarias usando falso techo de «zapán» (fibra vegetal del tallo de la planta del plátano) debajo del techo de láminas de acero galvanizado.

Palabras clave: Cubiertas, transferencia y estrés térmicos, confort, salud.

ALTERNATIVE SOLUTIONS TO REDUCE THERMAN DURING IN THE AFTERNOON IN SOCIAL HOUSING WITH GALVANISED STEEL SHEET ROO THE WARM AND HUMID CLIMATE PORTOVIEJO

Abstract

The zinc tile is a building material widely used in social housing over the developing world. From the thermal point of view, it is favourable in warm and humid climates at night, but people staying at home during the afternoon are exposed to extreme hot conditions. The present paper shows the results of several researches carried out in Portoviejo, Ecuador, in order to propose alternative low cost solutions to reduce indoor temperature during the afternoon based on the use of available local resources.

The research was developed in three stages, the first one corresponded to a field study in 49 zinc roof social housing; during the second, an inventory was made in order to propose alternative solutions to

reduce indoor temperature, which performance was finally tested in experimental modules. The results were statistically processed and a cost – benefit analysis was made.

Inhabitants are daily exposed to 8,5 hours of thermal stress, from 10:30 a.m. to 7:00 p.m., which could be reduced by the proposed alternative solutions, up to only three daily hours using a zapan ceiling below the traditional zinc roofs.

Keywords: *Roofs, thermal transfer and stress, comfort, health.*

2. Marco teórico

2.1- Cubierta, materiales y transferencia térmica en climas cálido-húmedos

Numerosas investigaciones se han enfocado en la transferencia térmica a través de la envolvente de las edificaciones, particularmente en la cubierta de la vivienda social, cuyos resultados aún reflejan posiciones contradictorias y problemas por resolver. Moreno, Morais y Souza [2017] demostraron que los techos de aluminio tenían mejor desempeño térmico que los de hormigón en la vivienda social de Brasil, mientras que Díaz [2012] reconoció la necesidad de mejorar el comportamiento de las cubiertas de «zinc» en la vivienda vernácula de República Dominicana, mediante una posible solución doble ventilada.

Por otro lado, Kabre [2010] otorga especial importancia al calor radiante proveniente del techo en el trópico húmedo y propone un índice para evaluar el desempeño térmico de esas cubiertas a partir de la temperatura de la superficie interior, asignando el peor valor (cero) al «zinc» y 1 a la solución que satisfaga las necesidades de confort para las condiciones específicas del clima local.

Gran atención se ha brindado también al estudio de materiales tradicionales y de nueva generación que contribuyan a reducir el flujo térmico a través de la cubierta en regiones tropicales [Pargana *et al.*, 2014]. Aditya *et al.* [2017] los clasifican en inorgánicos, orgánicos, combinados y materiales de nueva tecnología. También se investigan los elementos nanoestructurados y otras soluciones futuras como los aislamientos dinámicos y aplicaciones del hormigón [Jelle, 2011]. Pero las investigaciones de mayor interés para la sustentabilidad de los países en desarrollo son aquellas dedicadas al estudio de los materiales aislantes no convencionales, clasificados por Asdrubali, D'Alessandro y Schiavoni [2015] en naturales y reciclados. Entre los primeros se encuentran la caña, el bagazo, aserrín, maíz, algodón, palma, hojas de piña, arroz, girasol y paja, mientras que los reciclados incluyen espuma de vidrio, plásticos y fibras textiles. Mirón, Manea, Cantor and Aciu [2017] estudiaron la paja húmeda como material aislante orgánico, que puede también ser un buen regulador de la temperatura y la humedad como parte de un mortero.

La presente investigación pretende proponer soluciones que contribuyan a mejorar el ambiente térmico interior durante la tarde en la vivienda social con techo de «zinc» en Portoviejo, aprovechado los recursos locales disponibles, naturales o reciclados.

2. Marco teórico

2.1- Cubierta, materiales y transferencia térmica en climas cálido-húmedos

Numerosas investigaciones se han enfocado en la transferencia térmica a través de la envolvente de las edificaciones, particularmente en la cubierta de la vivienda social, cuyos resultados aún reflejan posiciones contradictorias y problemas por resolver. Moreno, Morais y Souza [2017] demostraron que los techos de aluminio tenían mejor desempeño térmico que los de hormigón en la vivienda social de Brasil, mientras que Díaz [2012] reconoció la necesidad de mejorar el comportamiento de las cubiertas de «zinc» en la vivienda vernácula de República Dominicana, mediante una posible solución doble ventilada.

Por otro lado, Kabre [2010] otorga especial importancia al calor radiante proveniente del techo en el trópico húmedo y propone un índice para evaluar el desempeño térmico de esas cubiertas a partir de la temperatura de la superficie interior, asignando el peor valor (cero) al «zinc» y 1 a la solución que satisfaga las necesidades de confort para las condiciones específicas del clima local.

Gran atención se ha brindado también al estudio de materiales tradicionales y de nueva generación que contribuyan a reducir el flujo térmico a través de la cubierta en regiones tropicales [Pargana *et al.*, 2014]. Aditya *et al.* [2017] los clasifican en inorgánicos, orgánicos, combinados y materiales de nueva tecnología. También se investigan los elementos nanoestructurados y otras soluciones futuras como los aislamientos dinámicos y aplicaciones del hormigón [Jelle, 2011]. Pero las investigaciones de mayor interés para la sustentabilidad de los países en desarrollo son aquellas dedicadas al estudio de los materiales aislantes no convencionales, clasificados por Asdrubali, D'Alessandro y Schiavoni [2015] en naturales y reciclados. Entre los primeros se encuentran la caña, el bagazo, aserrín, maíz, algodón, palma, hojas de piña, arroz, girasol y paja, mientras que los reciclados incluyen espuma de vidrio, plásticos y fibras textiles. Mirón, Manea, Cantor and Aciu [2017] estudiaron la paja húmeda como material aislante orgánico, que puede también ser un buen regulador de la temperatura y la humedad como parte de un mortero.

La presente investigación pretende proponer soluciones que contribuyan a mejorar el ambiente térmico interior durante la tarde en la vivienda social con techo de «zinc» en Portoviejo, aprovechado los recursos locales disponibles, naturales o reciclados.

2.2 Temperatura, confort, desempeño y salud

Cuando la sensación térmica percibida como consecuencia de la combinación de la temperatura del aire, la temperatura radiante, la humedad relativa, la velocidad del aire, la vestimenta y la actividad favorece el almacenaje de calor en el cuerpo, el sistema de termorregulación responde intentando incrementar su pérdida, pero cuando esto no ocurre en la medida necesaria, se genera un estrés térmico que conduce a la enfermedad e incluso a la muerte [Parson, 2003]. En la presente investigación se han asumido algunos valores límite de referencia para el confort y el estrés térmico.

Existen más de 80 índices desarrollados durante el pasado siglo para evaluar la sensación térmica percibida por las personas en términos de confort [Carlucci *et al.*, 2012]. El Voto de sensación verdadera «Actual Sensation Vote (ASV)», Sensación térmica «Thermal Sensation (TS)», (método de Givoni), Índice de discomfort «Discomfort Index (DI)» y el Índice de carga térmica «Heat Load Index (HL)» se calcularon para evaluar la sensación y el confort térmico durante el verano de Atenas en 2007 [Pantavau *et al.*, 2011]. El Índice de discomfort (DI) también se ha usado para evaluar la influencia de la distribución espacial del edificio en el confort, proponiendo un nuevo rango de valores [Din *et al.*, 2014]. Hendel *et al.* [2017] usaron el Índice de clima térmico universal «Universal Thermal Climate Index (UTCI)», Temperatura percibida «Perceived Temperature (PT)» y Temperatura fisiológica equivalente «Physiological Equivalent Temperature (PET)» para investigar apartamentos en París, tomando 26 °C como valor de ajuste.

La Temperatura de globo y bulbo húmedo «Wet Bulb Globe Temperature (WBGT)», Temperatura fisiológica equivalente «Physiologic Equivalent Temperature (PET)» y el Índice de temperatura climática universal «Universal Temperature Climate Index (UTCI)» han sido usados por Fang *et al.* (2019) para evaluar la relación entre el intenso entrenamiento desarrollado en exteriores por estudiantes universitarios y las enfermedades causadas por el calor. La Temperatura fisiológica equivalente «Physiological Equivalent Temperature (ET)» también se ha usado para evaluar la mortalidad en el norte de Irán [Sharadkhani *et al.*, 2018] y el impacto del ambiente térmico en la salud humana en Nigeria.

Pero los valores de referencia para evaluar la tolerancia, así como los índices de confort, no pueden ser generalizados o mecánicamente trasladados de unas circunstancias a otras, porque las personas se aclimatan en los procesos de termorregulación. La termorregulación fisiológica puede precisar ajustes del balance de calor, pero es efectiva solo en un estrecho rango relativo de temperaturas ambientales (aproximadamente 36,8 °C +/- 0,5) [Hanna and Tait, 2015]. Según estos autores el desempeño adaptativo expande la tolerancia térmica humana y permite vivir en climas extremos, ya que una vez que la persona se aclimata, la tolerancia al calor y el desempeño físico se incrementan significativamente, y el tiempo para sentirse exhausto puede duplicarse. Sin embargo, se recomienda detener la actividad física cuando la persona alcanza la temperatura crítica de 39,0 - 40 °C. Para las personas, en general, la muerte ocurre cuando la temperatura está cerca de 41 °C, pero daños permanentes en el funcionamiento del orga-

nismo pueden comenzar a temperaturas más bajas. El intercambio de calor es más lento cuando la temperatura del aire excede 20 °C, y disminuye significativamente cuando ésta es superior a 35 °C. Para Quinn *et al.* [2014], temperaturas interiores mayores que 35 °C corresponden a índices de calor con daño potencial. De acuerdo con Zander, Moss y Garnett [2017], el estrés térmico puede manifestarse antes de que los síntomas clínicos sean evidentes, con profundos efectos en el desempeño.

A pesar de que los rangos de confort tienen un carácter local y estudios sobre este tema no existen para Portoviejo, y aun sabiendo que las posibilidades para adaptarse a condiciones térmicas cambiantes son limitadas por el estrecho rango de temperaturas admitido por el cuerpo humano, ciertos valores se han tomado de la literatura internacional consultada para el análisis costo-beneficio.

Existe consenso en considerar aproximadamente 26 °C como punto de *cambio, límite de las condiciones de confort térmico* [Hendel *et al.*, 2017], [Pyrgou *et al.*, 2018]. Temperaturas cercanas a 30 °C y superiores a 28 °C se registran como *no confortables* en climas cálido-húmedos como el de Portoviejo [Omonijo, 2017; Nematousa *et al.*, 2019], de forma tal que la productividad, desempeño y concentración en las labores domésticas o el estudio comienzan a verse afectados. Finalmente, con temperaturas mayores que 35 °C, y cercanas a la temperatura del cuerpo, el intercambio de calor disminuye significativamente, constituyendo un calor potencialmente dañino para la salud en la vivienda [Hanna *et al.*, 2014; Quinn, A. *et al.*, 2014; Hatvani *et al.*, 2016].

Entonces, cuando la temperatura interior está por encima de 26 °C se considera que las personas pueden sentir calor, y cuando excede 28 °C y está cerca de 30 °C, se asumen posibles afectaciones a la productividad y las labores domésticas, aunque el efecto no pueda ser cuantificado, ya que las personas que hacen ese trabajo, por lo general no reciben un pago a cambio. Cuando la temperatura interior es cercana a 35 °C, se consideran potenciales afectaciones a la salud de los habitantes.

Las reducciones de temperatura que se obtienen con las soluciones alternativas de cubierta propuestas, contribuirían a reducir el período de tiempo en que los habitantes están expuestos a estrés térmico con afectaciones al confort, el desempeño y la salud. Otro posible beneficio económico directo podría obtenerse si se usara climatización artificial, lo cual no es habitual en este tipo de vivienda. No se han considerado las afectaciones al sueño, ya que el estrés térmico se genera en horas de la tarde.

3. Materiales y métodos

La investigación se ha desarrollado en tres etapas, la primera correspondiente al estudio de campo sobre la temperatura del aire interior en 49 viviendas sociales construidas por el Ministerio de Urbanismo y Vivienda (MIDUVI), con techos de «zinc», localizadas en cuatro sectores de la ciudad de Portoviejo (Colón, El Florón, Las Orquídeas y Picoazá). Un análisis gráfico permite identificar el período del día durante el cual los habitantes están expuestos a condiciones extremas de calor, de acuerdo con los valores de referencia asumidos, lo cual fue posteriormente verifi-

cado mediante un procesamiento estadístico de los resultados, usando el programa Stat-graphics.

Durante la segunda etapa se realizó un inventario para conocer los recursos locales disponibles (naturales o residuos a ser reciclados), en aras de proponer soluciones alternativas para reducir la temperatura del aire interior durante la tarde en las viviendas con techo de «zinc». Estas soluciones fueron monitoreadas en modelos experimentales de laboratorio.

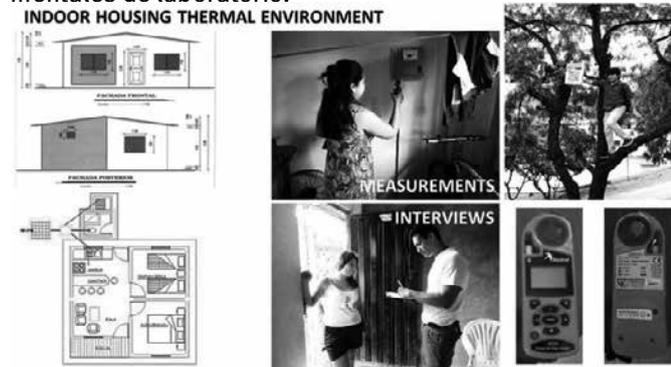


Fig. 1. Equipos de medición en interiores y exteriores.

Los resultados del estudio de campo se compararon con los ensayos de laboratorio durante la tercera etapa, a partir de un procesamiento estadístico que permitió identificar las diferencias entre los valores obtenidos por ambas vías y estimar la reducción del período de tiempo diario en que los habitantes están expuestos a estrés térmico. Esto fue complementado con un análisis de costo en el ciclo de vida de las soluciones técnicas propuestas.

Las mediciones de temperatura y humedad relativa se realizaron en las viviendas seleccionadas usando un equipo «Kestrel 4200 Pocket Air Flow Tracker», con precisión de ± 1 °C, localizado en el interior (sala de estar) a 1,50 m sobre el nivel de piso, programado para registrar valores de temperatura cada 60 minutos durante 24 horas. Las temperaturas exteriores de referencia también se midieron usando el mismo tipo de equipo, ubicado dentro de una cabina meteorológica a 2,00 m sobre el nivel del terreno, bajo un árbol, a menos de 10 m de la vivienda (Fig. 1).

Para comparar el desempeño de las soluciones de techo estudiadas se construyeron tres módulos unitarios mínimos (superficie interior de 1 m² y puntal de 2,60 m). Los módulos se ejecutaron con bloques de mortero de 10 cm de ancho en un polígono experimental, separados a 3,50 m entre ellos para evitar las sombras arrojadas en aras de tenerlos en las mismas condiciones en cuanto a la transferencia térmica a través de las paredes, de manera que las diferencias con respecto a la temperatura interior bajo las mismas condiciones del tiempo se deban solo a la solución de cubierta. El acceso al interior del módulo para colocar los instrumentos de medición a 1,50 m sobre el nivel de piso se produce mediante una pequeña puerta (1,00 m por 0,50 m) en la pared orientada al norte. Las mediciones de la temperatura del aire interior se desarrollaron de forma simultánea a las de la temperatura exterior, mediante otro equipo similar ubicado dentro de una pequeña cabina meteorológica localizada a dos metros de altura bajo un árbol a 50 m de los módulos experimentales (Fig. 2). Cada día se

observó y registró el estado del tiempo (soleado, nublado o lluvia), en aras de comparar mediciones no simultáneas.

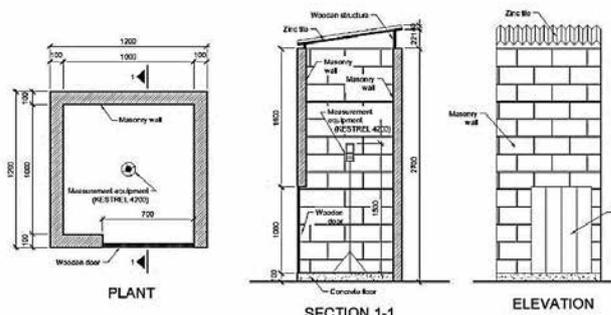


Fig. 2. Módulo experimental.

La experimentación en modelos de laboratorio fue desarrollada entre el 9 de marzo y el 2 de mayo, cubriendo dos de ellos con diferentes soluciones alternativas propuestas, mientras que la cubierta sencilla de láminas de acero galvanizado («zinc»), como caso básico, permaneció cubriendo el otro módulo. Los valores de temperatura interior medidos durante tres días para cada solución, fueron también relacionados con las temperaturas simultáneamente medidas en la estación meteorológica local.

4. Resultados y discusión

4.1- Período de estrés térmico en viviendas con cubierta de «zinc»

La ciudad de Portoviejo se localiza a 1° 0' de latitud Sur y 53 m sobre el nivel medio del mar, con una temperatura promedio de 28 °C y humedad relativa de 82 %. Su clima es cálido-húmedo, con una oscilación diaria de los valores de temperatura entre 8,1 °C y 12,3 °C, gran variación de la humedad relativa durante el día, con valores máximos por encima de 91 % en la noche y mínimos entre 40 % y 60 % al mediodía. Por eso el tiempo es cálido durante el día y muy húmedo en la noche, con estaciones de lluvia y seca muy bien definidas. La nubosidad es alta todo el año, entre seis y siete octavos, excepto en abril y septiembre, cuando baja a cinco octavos. Como resultado de la elevada nubosidad, el índice de insolación promedio anual es de 3,5 horas por día.

Los vientos predominantes provienen del noreste la mayor parte del año, y del sureste en mayo, junio, agosto y octubre, con bajas velocidades medias, oscilando entre 1,4 m/s en febrero y agosto, y 1,9 m/s en mayo. Esto hace aún más difícil alcanzar el confort térmico mediante la ventilación natural, por lo que reducir la carga térmica a través de la cubierta es muy importante.

Para determinar el período de estrés térmico en las viviendas con cubierta de «zinc», así como su reducción mediante las soluciones alternativas propuestas, se tuvieron en cuenta los valores asumidos: 26 °C, considerado como neutral y por tanto, confortable; 28-30 °C, estimado como no confortable, y 35 °C, con implicaciones negativas para la salud. Solo en 12 de las 49 viviendas monitoreadas la temperatura interior de 35 °C se alcanza

Soluciones alternativas para reducir el estrés térmico durante la tarde en la vivienda social con techo...

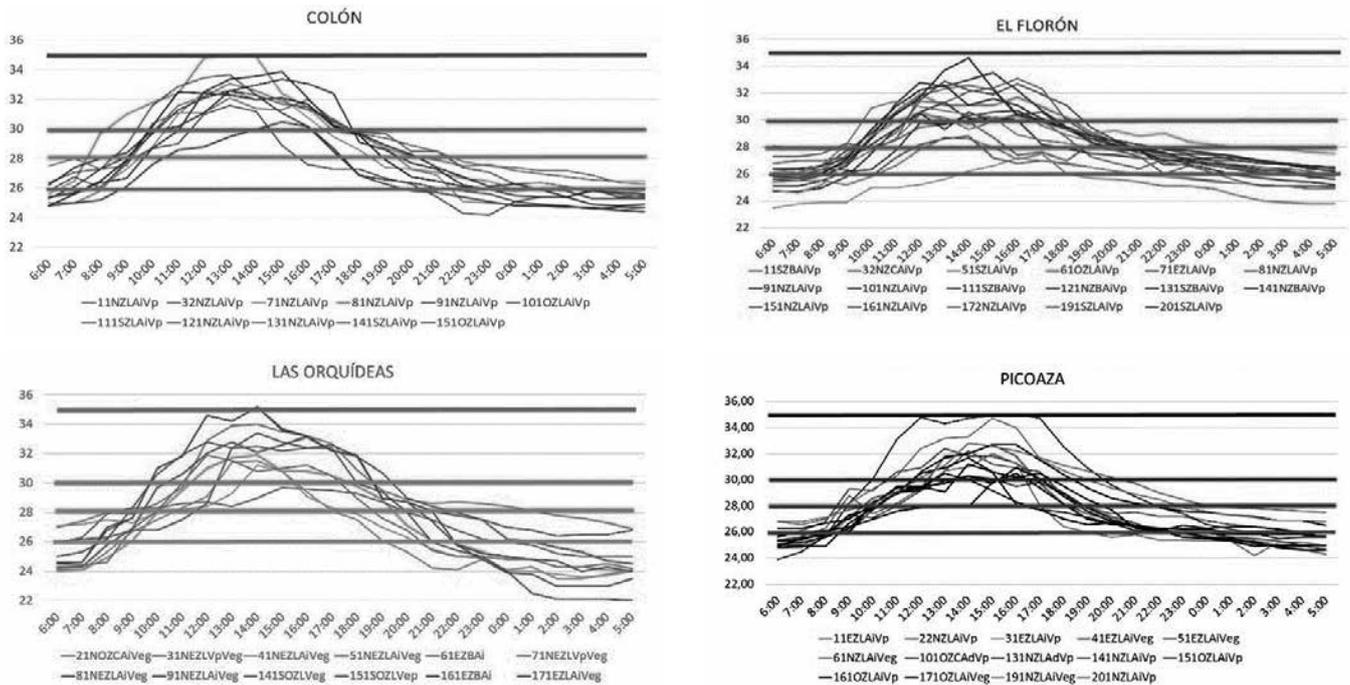


Fig. 3. Temperatura interior medida en viviendas con cubierta de «zinc» en cada sector urbano estudiado.

al mediodía, la mayoría de ellas (7) localizadas en Las Orquídeas, que es el más urbanizado de los sectores estudiados. En 13 de los 49 casos la temperatura está siempre por encima de la exterior. El período de tiempo en que la temperatura interior sobrepasa la exterior suele ser entre las 7:30 a.m. y las 6:00 p.m.

La Fig. 3 muestra las temperaturas interiores medidas en cada sector urbano en relación con los valores límites asumidos como referencia. Es posible apreciar el predominio del estrés térmico.

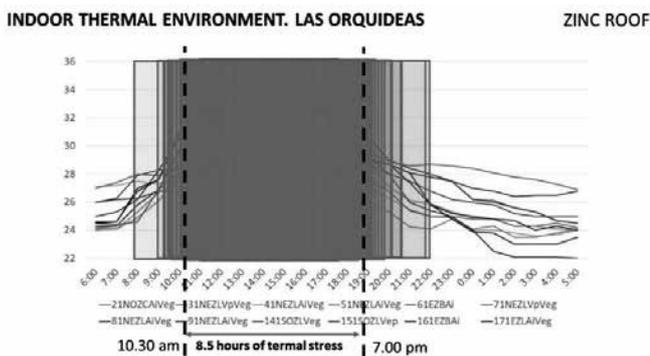


Fig. 4. Superposición de las temperaturas medidas en Las Orquídeas y los intervalos de tiempo durante los cuales los habitantes están sometidos a estrés térmico.

La Figura 4 muestra las temperaturas interiores medidas en Las Orquídeas y los períodos en que estas son superiores a 29 °C. Es posible apreciar un intervalo entre las 10:30 a.m. y las 7:00 p.m., de manera que para evaluar los beneficios obtenidos con las soluciones alternativas propuestas, se ha considerado un promedio de 8,5 horas de exposición al estrés térmico para los habitantes de viviendas con cubiertas de «zinc» en Portoviejo. El

análisis gráfico fue verificado mediante el procesamiento estadístico con Stats-Graphic de las temperaturas medidas.

4.2- Soluciones alternativas propuestas. Investigación de laboratorio en módulos experimentales

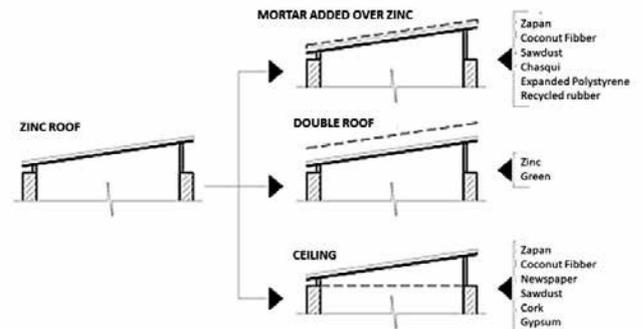


Fig. 5. Tipos de soluciones alternativas ensayados.

Con vistas a reducir la temperatura interior durante la tarde, se ensayaron tres tipos de soluciones alternativas para el techo de «zinc» (Fig. 5). La primera consistió en la adición de mortero sobre la lámina de «zinc», elaborado con fibras naturales, especialmente, «zapán», obtenido del tronco de la planta de plátano, y fibra de coco, también abundante en la región. Otro recurso adicionado al mortero fue el «chasqui», mineral obtenido de rocas volcánicas provenientes de las montañas, y usado para elaborar bloques. También se adicionaron al mortero residuos como el aserrín, goma picada proveniente de neumáticos de automóviles y polietileno expendido.

En segundo lugar se ensayó una doble cubierta de «zinc» con cámara de aire de 5 cm, 10 cm y 15 cm de espesor, incluyendo una doble cubierta verde separada a 10 cm

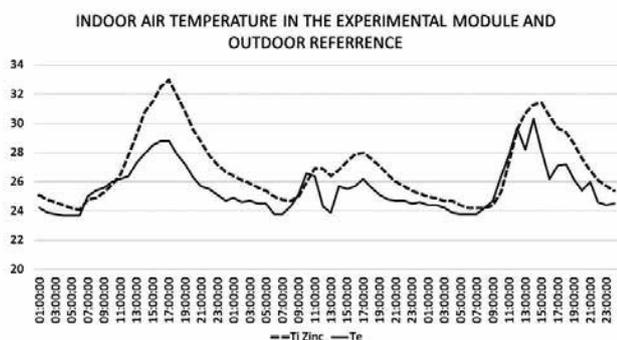


Fig. 6. Temperatura del aire interior en el módulo experimental con techo de «zinc».

del techo de «zinc». Es habitual en esta región añadir un falso techo a la cubierta ligera, no para mejorar su desempeño térmico, sino por razones estéticas. Es por ello que, finalmente, se añadieron algunos elementos debajo del techo de «zinc»: convencionales como el corcho y el yeso, fibras naturales como el «zapán» y el coco, y residuos reciclados como el papel periódico y el aserrín.

Las mayores diferencias entre la temperatura interior y exterior en los módulos experimentales cubiertos con

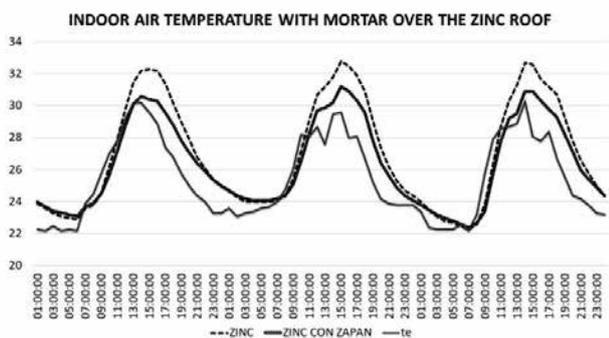


Fig. 7. Temperatura del aire interior en el módulo experimental adicionando mortero con «zapán» sobre el techo de «zinc». Mediciones realizadas en un día soleado de abril, 2016.

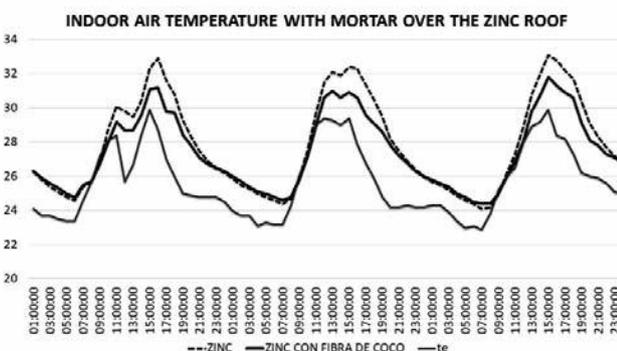


Fig. 8. Temperatura del aire interior en el módulo experimental añadiendo mortero con fibra de coco sobre el techo de «zinc». Mediciones realizadas en un día nublado y un día lluvioso de abril, 2016.

láminas de «zinc», alcanzan 4 °C entre las 3:00 p.m. y las 5:00 p.m., durante los días soleados, pero estas diferencias pueden reducirse a 2 °C cuando llueve (Fig. 6).

Mediciones realizadas en marzo de 2016. El primero y tercer día fueron soleados y el segundo lluvioso.

Añadiendo mortero con «zapán» sobre el techo de «zinc», la temperatura interior se reduce hasta 2 °C a las 4:00 p.m. (Fig. 7). El mortero con goma picada redujo la temperatura interior en el módulo experimental entre 1.5 °C y 2 °C, y con fibra de coco disminuyó hasta 2 °C en la tarde (Fig. 8).

La adición de mortero con aserrín y con poliestireno expandido también reduce la temperatura del aire interior durante la tarde, pero menos que los casos anteriores (1 °C), ya que esas mediciones se realizaron durante días nublados y lluviosos.

Los resultados indican que la acción de elementos como morteros con fibras naturales u otros componentes sobre el techo de «zinc», incrementa su desempeño térmico. Los mejores corresponden al «zapán» y la goma picada, durante días soleados (Δt hasta 2 °C), mientras que en días nublados y lluviosos las reducciones obtenidas con morteros que contienen aserrín, poliestireno expandido y chasqui solo alcanzan 1 °C. Sin embargo, el mortero con fi-

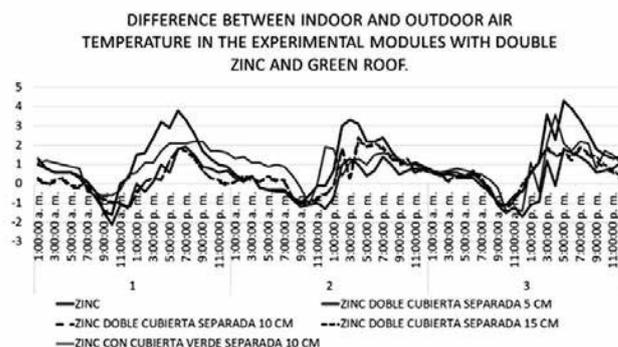


Fig. 9. Diferencia de la temperatura de aire interior con respecto al exterior en el módulo experimental con doble cubierta. Mediciones realizadas en marzo de 2016. Primera noche lluviosa y segundo día lluvioso para la cubierta verde doble

bra de coco sobre sobre el techo disminuye la temperatura interior en hasta 2 oC, aun en días nublados o soleados.

A pesar de los resultados diferentes obtenidos con doble cubierta, la cámara ventilada de 5 cm de espesor parece ser la mejor opción, con diferencias de hasta 2 °C durante la tarde. En el primer día la reducción de temperatura alcanzó cerca de 2 °C a las 7:00 p.m., pero la temperatura interior puede ser hasta 1,5 °C mayor en la noche (Fig. 9). La doble cubierta verde, a pesar de alcanzar reducciones de hasta 2 °C con respecto al techo de «zinc» durante la tarde, puede generar temperaturas mayores en la noche. Sin embargo, esas horas no son críticas.

El yeso es tradicionalmente empleado como material para falso techo en Portoviejo, y de acuerdo con las temperaturas medidas en los módulos experimentales, éste reduce los valores interiores en hasta 2 °C entre 3:00 p.m. y 4:00 p.m., independientemente de las condiciones del

tiempo (soleado o lluvioso). El falso techo de corcho es otro elemento producido industrialmente y disponible a un costo relativamente bajo. Sin embargo, su uso no es tradicional en viviendas. Este también reduce la temperatura interior en los módulos experimentales en más de 2 °C a las 3:00 p.m., aun durante días lluviosos.

Con la adición de un falso techo de aserrín la temperatura del aire disminuye durante la tarde en hasta 2 °C entre 2:00 p.m. y 4:00 p.m. en días soleados. Un falso techo de periódico reciclado, el cual es también un material muy aislante que constituye un residuo disponible, provocó una reducción de la temperatura interior de hasta 2 °C entre las 3:00 p.m. y las 4:00 p.m. en días soleados (Fig. 10). La mayor reducción de la temperatura interior se obtuvo adicionando un falso techo de «zapán» a la cubierta de «zinc». En ese caso, el efecto se mantiene durante toda la tarde y alcanza hasta 3 °C en días soleados (Fig. 11).

Como puede verse, la adición de materiales alternativos disponibles localmente como falso techo a la tradicional cubierta de «zinc» resulta, en términos generales, más efectiva para reducir la temperatura interior que la adición de esos materiales en morteros sobre esta. A pesar de que las mediciones realizadas no fueron todas simultáneas, la comparación es posible por el predominio de los días soleados.

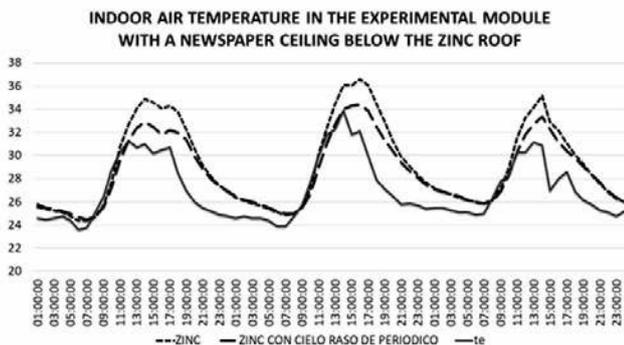


Fig. 10. Temperatura del aire interior en los módulos experimentales adicionando un falso techo de periódico a la cubierta de «zinc». Mediciones realizadas en días soleados y la última tarde lluviosa, marzo de 2016.

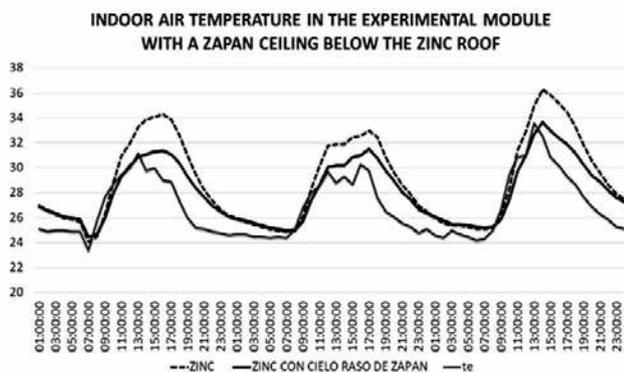


Fig. 11. Temperatura del aire interior en el módulo experimental adicionando un falso techo de «zapán» a la cubierta de «zinc». Mediciones realizadas en días soleados y la última noche lluviosa, marzo 2016.

Para verificar la influencia de la escala de los módulos en el resultado de los experimentos, las temperaturas registradas en las viviendas monitoreadas se compararon con las obtenidas en el experimento de laboratorio, ambas con techos sencillos de «zinc», mediante un procesamiento estadístico usando Stats-graphics. Como las mediciones no fueron simultáneas, la comparación se basó en las diferencias entre la temperatura interior registrada en las viviendas y en los módulos experimentales con respecto a la temperatura simultáneamente registrada en el punto exterior de referencia en cada caso.

La Fig. 12 muestra la correlación entre los histogramas de la diferencia horaria de temperatura (ti-te) registrada en las viviendas y en los módulos experimentales con respecto a los valores de referencia exterior. A pesar de que la temperatura interior en las viviendas es influenciada por un amplio rango de variables, éstas presentan una menor variación con respecto al exterior que las registradas en los módulos, donde la amplitud de los valores medidos se incrementa desde el mediodía.

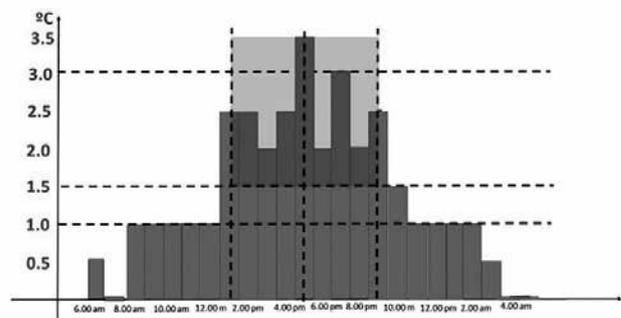


Fig. 12. Combinación de histogramas que representan la distribución de valores de la diferencia entre la temperatura interior con respecto al exterior, medido en las viviendas y en los módulos experimentales con techo sencillo de «zinc».

Durante la noche y la mañana (de 11:00 p.m. a 12:00 m.), las temperaturas registradas en los módulos experimentales se concentran dentro del rango de valores de las viviendas, con diferencias de hasta 1 °C en el punto medio del rango predominante, siendo mayor en los módulos. Entre la 1:00 p.m. y las 9:00 p.m., la temperatura interior en los módulos es aún mayor con respecto al exterior que en las viviendas, con diferencias de Δt entre 1.5 °C y 2,5 °C, alcanzando incluso 3 °C a las 7:00 p.m. y el mayor valor de 3,5 °C se obtiene a las 5:00 p.m.

Este período (de 1:00 p.m. a 9:00 p.m.) cuando la diferencia entre la temperatura registrada en los módulos con respecto al exterior es mayor en más de 1 °C que la medida en las viviendas, coincide con seis de las 8,5 horas en las que se ha asumido que los habitantes están expuestos a condiciones térmicas extremas (de 10:30 a.m. 7:00 p.m.), lo cual indica que las temperaturas medidas en los módulos experimentales sobredimensionan aquello a lo que las personas podrían estar expuestas durante ese período. Esto puede ser

consecuencia del calor proveniente de las paredes expuestas al sol, ya que, si bien esto no es significativo en las viviendas, su efecto se incrementa en el reducido espacio de 1 m².

Las soluciones alternativas propuestas provocan una reducción de la temperatura interior en los módulos experimentales con respecto al techo de «zinc» ensayado en ellos. Por tanto, los resultados son comparables bajo las mismas condiciones, a pesar de que se han verificado los efectos de la escala, con lo cual las reducciones reales podrían ser menores que las registradas en el ensayo.

4.3- Costo-beneficio

De acuerdo con el costo anual, las soluciones basadas en el uso de fibras naturales son las más económicas, con un valor inferior \$5,00/ m², especialmente aquellas que usan «zapán», con independencia de la estructura que se emplee. Entre las soluciones aglomeradas la más económica es la que utiliza periódico reciclado. En cualquier caso, los costos iniciales de ejecución de las soluciones de falso techo propuestas alcanzan un costo entre \$ 250,00 y \$ 500,00 para toda la vivienda.

El costo inicial de ejecución de los morteros adicionados sobre el techo de «zinc» es relativamente bajo (entre \$ 200,00 y \$ 250,00), y favorece la reducción del costo anual del techo de «zinc» durante su vida útil (\$ 13,25), ya que incrementa su durabilidad.

De igual manera que la estimación del período en que los habitantes están expuestos a condiciones de calor extremas, el análisis de su posible reducción mediante las soluciones alternativas propuestas se hizo en forma gráfica y fue posteriormente corroborado mediante un procesamiento estadístico. Como resultado se estima que cuando la temperatura interior se reduce en 1 °C (mortero de aserrín sobre el techo de «zinc») el período de estrés térmico disminuye en aproximadamente 2,5 horas, limitándose a seis horas. Cuando la disminución de la temperatura interior es 2 °C (mortero con fibra de coco o «zapán» sobre el techo de «zinc» o falso techo hecho con fibra de coco, aserrín o periódico bajo este), el período de estrés térmico se acorta aproximadamente 4,5 horas, reduciéndose a cuatro horas, mientras que si el descenso es de hasta 3 °C (falso techo de «zapán»), el período de estrés térmico puede durar solo tres horas, entre la 1:00 p.m. y las 4:00 p.m. (Fig.13).

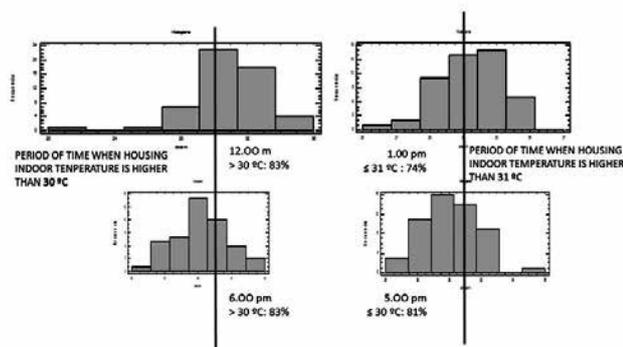


Fig.13. Histogramas representando la distribución de valores de la temperatura interior medida en las viviendas con valores superiores e inferiores a 30 °C y 31 °C.

5. Conclusiones

A pesar de que se incrementan las investigaciones enfocadas en evaluar la transferencia térmica a través de las cubiertas de la vivienda social en climas cálido-húmedos, los resultados son aun contradictorios y las soluciones deben ser locales, según las condiciones climáticas específicas y los recursos disponibles.

Independientemente del carácter local de los rangos de confort como consecuencia del proceso de aclimatación, el reducido rango de temperatura admitido por el cuerpo humano permite asumir 26 oC como límite para el confort térmico, temperaturas superiores a 29 oC como no confortables y mayores de 35 oC como potencialmente dañinas para la salud.

A partir de las temperaturas medidas en 49 viviendas con techo de «zinc» en Portoviejo, se puede afirmar que, de manera general, sus habitantes están expuestos a 8,5 horas de estrés térmico entre las 10:30 a.m. y las 7:00 p.m.

Según el ensayo de laboratorio desarrollado en módulos experimentales, es posible reducir el período de estrés térmico a seis horas diarias, adicionando sobre el techo de «zinc» morteros elaborados con residuos como aserrín; a cuatro horas diarias si el mortero usa fibras naturales como el coco o el «zapán», o adicionando un falso techo elaborado con materiales reciclados tales como el periódico, y a solo tres horas diarias con falso techo de «zapán».

Referencias bibliográficas

- ADITYA, L., MAHLIA, T. M., RISMANCHI, B., NG, H. M., HASAN, M. H., METSELAAR, H. S., & ADITYA, H. B. (2017). A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and sustainable energy reviews*, 73, 1352-1365. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.034>
- ASDRUBALI, F., D'ALESSANDRO, F., & SCHIAVONI, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1-17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
- CARLUCCI, S., & PAGLIANO, L. (2012). A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings. *Energy and Buildings*, 53, 194-205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.015>
- DÍAZ, O. (2012). *La cubierta metálica en el clima cálido húmedo: análisis del comportamiento térmico del techo de zinc de la vivienda vernácula dominicana*. Catalunya: Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. <https://upcpmmons.uc.edu.es>
- DIN, M. F., LEE, Y. Y., PONRAJ, M., OSSEN, D. R., IWAQ, K., & CHELLIAPAN, S. (2014). Thermal comfort of various building layouts with a proposed discomfort index range for tropical climate. *Journal of thermal biology*, 41, 6-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtherbio.2014.01.004>
- FANG, Z., XU, X., ZHOU, X., WU, H., LIU, J. AND LIN, Z. (2019). Investigation into the thermal comfort of university students conducting outdoor training. *Building and Environment*, 149, 26 – 38. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.003>
- HANNA, E. G., & TAIT, P. W. (2015). Limitations to Thermoregulation and Acclimatization Challenge Human Adaptation to Global Warming. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12, 8034-8074. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph120708034>

- HATVANI, K. G., BELUSKO, M., SKINNER, N., POCKETT, J., & BOLAND, J. (2016). Drivers and barriers to heat stress resilience. *Science of the Total Environment*, 571, 603-614. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.028>
- HATVANI, K. G. BELUSKO, M., SKINNER, N., POCKETT, J. AND BOLAND, J. (2016). Heat stress risk and resilience in the urban environment. *Sustainable Cities and Society*, 26, 278-288. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.019>
- HENDEL, M., AZOS-DÍAZ, K. AND TREMEAC, B. (2017). Behavioral adaptation to heat-related health risks in cities. *Energy and Buildings*, 152, 823 – 829. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.22.063>
- JELLE, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions—Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 43, 2549-2563. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.015>
- KABRE, C. (2010). A new thermal performance index for dwelling roofs in the warm humid tropics. *Building and Environment*, 45, 727-738. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.017>
- LOENHOUT, J. A. F., GRAND, A., DUJIM, F., VINK, N. M., HOEK, G. AND ZUURBIER, M. (2016). The effect of high indoor temperatures on self-perceived health of elderly persons. *Environmental Research*, 146, 27 – 34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2015.12.012>
- MIRON, I. O., MANEA, D. L., CANTOR, D. M., & ACIU, C. (2017). Organic Thermal Insulation Based on Wheat Straw. *Procedia Engineering*, 181, 674-681. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
- MORENO, A. C., MORAIS, I. S., & SOUZA, R. G. (2017). Thermal Performance of Social Housing—A Study Based on Brazilian Regulations. *Energy Procedia*, 111, 111-120. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
- NEMATCHOUSA, M. K., RICCIARDI, P., ORROSA, J. A., ASADI, S., & CHOUNDHARY, R. (2019). Influence of indoor environmental quality on the self-estimated performance of office workers in the tropical wet and hot climate of Cameroon. *Journal of Building Engineering*, 21, 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.10.007>
- OMONIJO, A. G. (2017). Assessing seasonal variations in urban thermal comfort and potential health risks using Physiologically Equivalent Temperature: A case of Ibadan, Nigeria. *Urban Climate*, 21, 87-105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.006>
- Pantavau, K., Theoharatos, G., Mavrikakis, A., & Santamouris, M. (2011). Evaluating thermal comfort conditions and health responses during an extremely hot summer in Athens. *Building and Environment*, 46, 339-344. <http://dx.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.026>
- PARGANA, N., PINHEIRO, M. D., SILVESTRE, J. D., & BRITO, J. (2014). Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings. *Energy and Buildings*, 82, 466-481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.057>
- PARSON, K. C. (2003). *Humann Thermal Environments. The Effects of Hot, Moderate and Cold Environments on Human Health, Comfort and Performance*. (3rd ed). London New York: CRC Press.
- PYRGOU, A., & SANTAMOURIS, M. (2018). Increasing probability of heat-related mortality in a Mediterranean city due to urban warming. *International journal of environmental research and public health*, 15, 1571. <https://doi.org/10.3390/ijerph15081571>
- QUINN, A., TAMARIUS, J. D., PERZANOWSKI, M., JACOBSON, J. S., GOLDSTEIN, I., ACOSTA, L., & SHAMAN, J. (2014). Predicting indoor heat exposure risk during extreme heat events. *Science of the Total Environment*, 490, 686-693. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.039>
- SAMPSON, N. R., GRONLUND, C. J., BUXTON, M. A., CATALANO, L., WHITE, N., COLON, K. C., & PARKER, E. A. (2013). *Staying cool in a changing climate: Reaching vulnerable populations during heat events*. *Global Environmental Change*, 23, 475-484. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.12.011>
- SHARADKHANI, R., KAHANJANI, N., BAHRAM, B., JOHANI, Y. AND TABRIZI, J. S. Physiological Equivalent Temperature Index and mortality in Tabriz (The northwest of Iran). (2018). *Journal of Thermal Biology*, 71, 195 – 201. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.11.012>
- UEJIO, C. K., WILHELM, O. V., GOLDEN, J. S., MILLS, D. M., GULINO, S. P., & SAMENOW, J. P. (2011). *Intra-urban societal vulnerability to extreme heat: the role of heat exposure and the built environment, socioeconomics, and neighborhood stability*. *Health & Place*, 17, 498-507. <http://dx.doi.org/10.1016/j.healthplace.2010.12.005>
- WANG, J., KUFFER, M., SLIUZAS, R., & KOHLI, D. (2019). The exposure of slums to high temperature: Morphology-based local scale thermal patterns. *Science of the total environment*, 650, 1805-1817. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.324>
- ZANDER, K. K., MOSS, S. A., & GARNETT, S. T. (2017). Drivers of self-reported heat stress in the Australian labour force. *Environmental research*, 152, 272-279. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2016.10.029>
- ZUO, J., PULLEN, S., PALMER, J., BENNETTS, H., CHILESHE, N., & MA, T. (2015). Impacts of heat waves and corresponding measures: a review. *Journal of Cleaner Production*, 92, 1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.078>

Recibido: 28 de diciembre de 2021.

Aceptado: 27 de enero de 2022.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existe conflictos de intereses.

Contribución de los autores: Investigación, redacción–borrador original: José Fabián Véliz Párraga. Conceptualización, metodología, supervisión, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición: Dania González Couret: