

# Variables de diseño de cubiertas ventiladas metálicas en el clima cálido húmedo

Violeta Escobar Ruiz <sup>1</sup> | Anna Pages-Ramon <sup>2</sup> | Antonio Isalgué <sup>3</sup> | Helena Coch Roura <sup>4</sup>

Recibido: 31-07-2022 | Versión final: 20-03-2023

## Resumen

La construcción con cubiertas de lámina metálica auto portante está muy extendida entre la población con bajos recursos económicos y tecnológicos debido a su reducido costo y facilidad de instalación. En latitudes con alta radiación solar directa y difusa, su comportamiento térmico es muy desfavorable debido a su alta transmitancia. Crear una cubierta de doble hoja con posibilidad de ventilación puede significar una mejora de las condiciones de confort interiores. En este estudio se definen 3 variables de diseño de cubiertas ventiladas metálicas para evaluar su comportamiento ante la transferencia de calor en un clima cálido húmedo. Las variables estudiadas son: la separación de las hojas, la inclinación de la cubierta y la reflectancia del acabado superficial exterior. Con el objetivo de comparar el comportamiento térmico de las cubiertas ventiladas, se midieron las temperaturas superficiales y del aire en distintas condiciones a lo largo de 5 meses, para lo cual, se fabricaron cuatro prototipos, uno de ellos con cubierta simple y tres con cubiertas ventiladas, con la posibilidad de modificar sus variables de diseño. Dichas modificaciones permitieron identificar los rangos de configuración que presentaron menores incrementos de temperatura con respecto a la cubierta simple de referencia. Los resultados obtenidos muestran que una alta reflectividad de la hoja exterior, una mayor separación de las hojas y un aumento de la inclinación de la cubierta son factores que permiten disminuir el sobrecalentamiento por cubierta, siendo el nivel de reflectancia del acabado superficial de la hoja exterior el parámetro con mayor impacto.

**Palabras clave:** cubierta doble; cubierta metálica; clima cálido; control térmico

## Citación

Escobar Ruiz, V. et al. (2023). Variables de diseño de cubiertas ventiladas metálicas en el clima cálido húmedo. *ACE: Architecture, City and Environment*, 18(52), 11811. <https://dx.doi.org/10.5821/ace.18.52.11811>

# Design Variables of Metal Sheet Ventilated Roofs in Hot Humid Climate

## Abstract

In hot-humid climates, construction of self-supporting metal sheet roofing is widespread among population with low economic and technological resources due to its low cost and ease of installation. In latitudes close to the equator, with high direct and diffuse solar radiation, thermal behavior of metal roofing is very unfavorable because of its high transmittance and the amount of radiation received by the horizontal plane. Duplicating the metal sheet by creating a double sheet roof with the possibility of ventilation can mean an improvement in interior comfort conditions. In this study, 3 design variables of ventilated metal roofs are defined to evaluate their heat transfer behavior in a hot-humid climate. The studied variables are: distance between the metal sheets, roof inclination and reflectance of exterior surface finish. In order to compare the thermal behavior of the ventilated roofs, surface and air temperatures were measured under different conditions over a 5-months period. Hence, four modules were manufactured, one with a single metal sheet roof and three with ventilated cavities, all of them with the possibility of changing the design variables. These modifications allowed to identify the configuration ranges that presented lower temperature records compared with a simple metal sheet roof. Results showed that a high reflectance level of the external foil, a greater distance between the metal sheets and a pronounced roof inclination, are factors that allow reducing roof overheating, in which surface reflectance level of the external sheet was the parameter with the greatest cooling impact.

**Keywords:** double roof; metal roof; hot climate; thermal control

<sup>1</sup> Dra. Arquitecta, Profesora Investigadora de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) (ORCID: [0000-0003-4433-5657](https://orcid.org/0000-0003-4433-5657)); <sup>2</sup> Dra. Arquitecta, Profesora Agregada, Arquitectura, Energía y Medio Ambiente (AiEM), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). (ORCID: [0000-0003-3507-8492](https://orcid.org/0000-0003-3507-8492), WoS ResearcherID: [1-4646-2017](https://orcid.org/1-4646-2017), Scopus Author ID: [50861767300](https://orcid.org/50861767300)); <sup>3</sup> Dr. en Física, Catedrático, Arquitectura, Energía y Medio Ambiente (AiEM), Universitat Politècnica de Catalunya, (UPC). (ORCID: [0000-0002-4354-5831](https://orcid.org/0000-0002-4354-5831), Scopus Author ID: [7004080030](https://orcid.org/7004080030), WoS ResearcherID: [M-2459-2014](https://orcid.org/M-2459-2014)); <sup>4</sup> Dra. Arquitecta, Catedrática, Arquitectura, Energía y Medio Ambiente (AiEM), Universitat Politècnica de Catalunya, (UPC). (ORCID: [0000-0001-9524-8057](https://orcid.org/0000-0001-9524-8057); WoS Researcher ID: [1-2153-2017](https://orcid.org/1-2153-2017); Scopus Author ID: [6603101372](https://orcid.org/6603101372)). Correo de contacto: [violeta.escobar@ujat.mx](mailto:violeta.escobar@ujat.mx)

## 1. Introducción

En el clima cálido húmedo, la temperatura del aire, la radiación solar directa y difusa y la humedad relativa se encuentran en niveles en los que alcanzar el confort térmico en los edificios con medios pasivos solo es posible con la utilización de estrategias muy concretas, como son la protección a la radiación y la ventilación (Serra Florensa, 1999). Estas problemáticas se presentan en el sur de Florida; las islas del mar Caribe; Centroamérica; amplias regiones en Sudamérica; así como algunas regiones de África, el subcontinente indio y el sudeste asiático.

En latitudes cercanas a los trópicos y en los trópicos la radiación solar incidente sobre la cubierta es mucho mayor a la del resto de los paramentos debido principalmente a que ésta recibe más horas de sol, y al ángulo de incidencia que, en los trópicos, está cerca del cenit en horas cercanas al medio día (Kabre, 2010). Por este motivo, frecuentemente la cubierta sufre un sobrecalentamiento que, en los días más soleados y calurosos, puede registrar temperaturas superficiales muy altas, conduciendo este calor al interior del recinto.

El sobrecalentamiento por cubierta incide negativamente en el confort térmico, no solo porque eleva el promedio de temperaturas radiantes de un espacio, sino porque incrementa la diferencia entre la temperatura radiante y la del aire (Klein & Schlenger, 2008) y genera asimetrías térmicas con planos radiantes por encima de la cabeza que acentúan la sensación de desconfort (Kabre, 2010).

La importancia del estudio de estrategias que permitan un cierto control de la reemisión de calor al interior de los espacios habitados se pone de manifiesto, no solo como estrategia para disminuir el consumo energético de sistemas activos de acondicionamiento climático, sino como un medio que permita elevar la calidad de vida de las personas que los habitan (Auliciems & Szokolay, 2007).

La presencia de cubiertas de hoja simple con láminas metálicas autoportantes es común y está muy extendida entre la población con bajos recursos económicos y tecnológicos debido a su bajo costo y a la facilidad y rapidez de instalación. En climas cálidos, la cubierta metálica simple tiene un comportamiento térmico muy desfavorable, en comparación con otros materiales comunes como el hormigón y las fibras naturales (Barrios et al., 2012; Kabre, 2010)-(Torres-Quezada et al., 2019). Las láminas de chapa metálica también presentan problemas acústicos al transmitir una gran cantidad de sonidos desde el exterior debido a su reducido espesor.

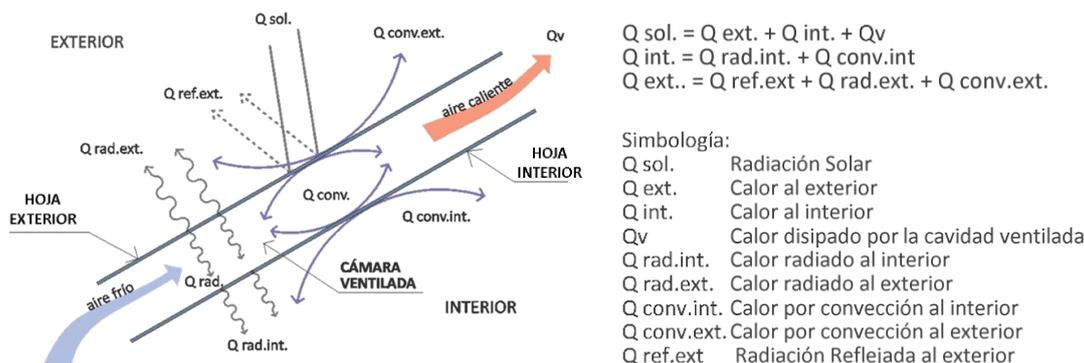
La cubierta ventilada es una solución constructiva económica y eficaz para evitar el sobrecalentamiento (Lima-Télez et al., 2022), gracias a la reducción de la carga térmica debida al sombreado producido por la hoja exterior y por la presencia de una cámara ventilada entre las dos hojas que le permite disipar parte del calor captado, reduciendo la transmisión de calor al espacio interior. Sin embargo, poco se ha estudiado su aplicación específica en el clima cálido húmedo y su comportamiento utilizando hojas metálicas sin aislamiento térmico.

El objetivo de este trabajo es establecer acciones de mejora en las condiciones interiores de las edificaciones con una hoja simple metálica mediante una intervención de bajo coste económico y tecnológico, evaluando la mejora térmica que se produce al añadir otra hoja metálica a la cubierta existente, creando así una cubierta ventilada.

La evaluación se centra en identificar las posibles variables de diseño de estas cubiertas ventiladas para identificar la repercusión que cada una de estas variables tiene en la reducción del sobrecalentamiento en el espacio interior, en climas cálido húmedos con una elevada radiación solar.

La cubierta ventilada está formada por dos hojas separadas entre sí por una “cámara de aire ventilada” comunicada con el aire exterior. La hoja superior se encuentra en contacto directo con los agentes atmosféricos. La hoja inferior, en contacto directo con el espacio habitable, conserva una temperatura menor a la de la hoja exterior al no recibir radiación directa del sol. El aire contenido en la cámara, cuando la cubierta recibe la radiación del sol, eleva su temperatura y baja su densidad provocando, en ausencia de viento, un flujo constante de aire que es remplazado por el externo más frío. De esta forma, es posible disipar parte del calor acumulado en la cámara (Lee et al., 2009) (Figura 1).

Figura 1. Mecanismos de transferencia de energía en la cubierta ventilada



Fuente: Elaboración propia a partir de (Lee et al., 2009).

Ambas estrategias; la de sombreado y la de intercambio de aire a diferentes temperaturas, permiten disminuir el flujo de calor hacia el espacio que está debajo de la cubierta ventilada. La pérdida de calor de la cubierta ventilada se lleva a cabo principalmente en la cara expuesta al exterior y en la cámara ventilada por diferentes fenómenos: 1) reflexión del acabado superficial, 2) convección del aire en contacto con las hojas que conforman la cubierta y 3) reemisión de onda larga de la energía acumulada en las hojas que la conforman. De esta forma, la mayor parte de la energía es disipada hacia el exterior, sin embargo, la que no logra disiparse, permite el incremento de temperatura del espacio cubierto.

En estudios revisados en la bibliografía existente, se pudieron identificar las variables de diseño más habituales en las cubiertas ventiladas, así como el impacto de cada una en su comportamiento. Entre los más importantes podemos destacar: Nivel de aislamiento de la hoja interior, Nivel de absorbancia de la hoja exterior, Acabado superficial (emisividad y absorbancia) de las hojas exterior e interior, Separación entre las láminas (anchura) de la cámara ventilada, Inclineración de la cubierta y Efecto del viento. El comportamiento general de dichos parámetros se resume en la Tabla 1 (Escobar Ruiz, 2018).

Tabla 1. Relaciones existentes entre las variables identificadas en el diseño de cubierta ventilada y el tipo de transmisión energética sobre el que actúan

Variabes	Convección	Radiación	Conducción
Aislamiento	Variación de la temperatura y flotabilidad térmica del aire de la cámara. (Bianco et al., 2018; Biwole et al., 2008)	-	Variación del flujo de calor al interior del espacio. (Bianco et al., 2018; Biwole et al., 2008; Gagliano et al., 2012; Givoni, 1969; Omar et al., 2017; Özdeniz & Hançer, 2005)
Absortancia Hoja exterior	Variación de la temperatura y flotabilidad térmica del aire de la cámara. (Givoni, 1969)	Variación de la reemisión de calor al interior del espacio. (Givoni, 1969; Rawat & Singh, 2022; Synnefa et al., 2012)	
Emisividad		Variación de la reemisión de calor al interior del espacio. (Banionis et al., 2012; Biwole et al., 2008; Černe & Medved, 2007; Givoni, 1969; Košny et al., 2012)	
Separación entre las láminas de la cámara	Incidenca en la fricción y en la velocidad del aire al interior de la cámara. (Chang et al., 2008; Ciampi et al., 2005; Dimoudi et al., 2006; Lee et al., 2009; Manca et al., 2014; May Tzuc et al., 2019)		

Inclinación	Variación del empuje del aire por flotabilidad térmica. (Bivole et al., 2008; Chang et al., 2008; Lee et al., 2009; Manca et al., 2014)	Cambio en la incidencia de radiación reemitida por cubierta en el espacio interior. (Kabre, 2010)	
Orientación vientos dominantes	Inducción de ventilación forzada por la cámara con impactos variables en el caudal de aire. (Afonso & Oliveira, 2000; Labat et al., 2012)		

Fuente: Elaboración propia.

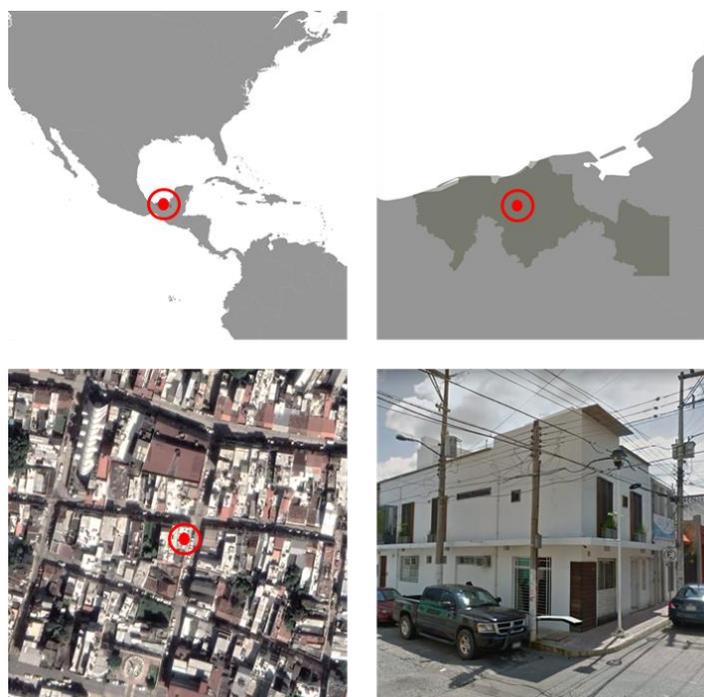
## 2. Metodología

Para conseguir el objetivo del presente estudio, se planteó una metodología experimental en un clima cálido – húmedo. Dicha metodología se basa en la observación del comportamiento térmico de diferentes configuraciones de cubiertas metálicas realizando el seguimiento de sus temperaturas. El estudio se llevó a cabo del 22 de agosto de 2015 hasta el 2 de febrero de 2016, tiempo durante el cual se midieron 11 configuraciones distintas de cubiertas ventiladas metálicas, así como un prototipo de cubierta simple de referencia. En los prototipos se instaló un sistema de adquisición de datos conectado a sensores para registrar sus temperaturas. Una vez obtenidos los registros de temperatura de los prototipos, se determinó un criterio de comparación de datos que permitiese establecer el grado de incidencia de cada una de las variables de diseño en el comportamiento térmico de las cubiertas ventiladas.

### 2.1 Localización

La instalación de los prototipos experimentales utilizados en el presente estudio se realizó en la planta de azotea de un edificio de 2 niveles, localizado en un medio urbano denso, en un predio cercano al centro histórico de la ciudad de Villahermosa, Tabasco en México. (Figura 2).

Figura 2. Localización del estudio



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de GoogleEarth.

El estado de Tabasco se encuentra situado en una región tropical de clima cálido húmedo, cercana al nivel del mar, entre los paralelos 18° 39' y 17° 19' de latitud norte y entre los meridianos 90° 57' y 94° 8' de longitud oeste. La temperatura media anual es de 28.2°C. La temperatura media máxima es de 34.7°C y la temperatura media mínima es de 21.8°C, siendo mayo el mes más cálido y enero el mes más frío. La precipitación media del estado de Tabasco es de 2,300 mm anuales, ésta se presenta todo el año, siendo más abundante entre junio y octubre (Servicio Meteorológico Nacional, 2023)

## 2.2 Definición de las variables de diseño

Se identificaron las variables arquitectónicas que, en estudios previos, habían demostrado incidencias importantes en el comportamiento térmico de cubierta ventilada, que son: anchura de la cámara ventilada, reflectancia del acabado superficial y grado de inclinación de la cubierta (Li et al., 2016; Manca et al., 2014; Tong & Li, 2014).

Para determinar los rangos de las variables de diseño a evaluar se consideraron las especificaciones técnicas de las láminas metálicas más comunes en cubiertas para casa habitación, en las cuales se establece una inclinación mínima de 10% (Acerotechos, 2022; Ternium, 2018). También se tomaron en cuenta estudios previos del comportamiento térmico con simulaciones energéticas realizados a amplios rangos de las variables analizadas, permitiendo identificar aquellos que presentaron un comportamiento térmico particular (Escobar Ruiz, 2013). Así, se establecieron los valores mínimos y máximos de las variables; y uno intermedio que permitiera analizar el comportamiento entre ambos.

En el presente estudio, no se han considerado elementos portantes dentro de las cavidades, ya que estos podrían interferir con la ventilación de la cubierta. Existen alternativas para garantizar la ventilación que permiten separar las hojas para generar la cavidad sin restringir su altura, permitiendo el paso del aire por la cavidad. Dichas alternativas pueden, o no, formar parte de la estructura portante de la cubierta y su estudio ha quedado fuera del alcance de este trabajo.

Por otro lado, en el mercado existe una amplia variedad de patrones para conformar las nervaduras en las láminas metálicas autoportantes. Estos diseños consideran peraltes y espaciamiento entre los canales que podrían arrojar sombras sobre la techumbre o influir en el comportamiento del flujo de aire a través de las cámaras, por lo cual, en el presente estudio se ha optado por una lámina lisa que permita observar el comportamiento aislado de las variables planteadas.

De esta forma fue posible acotar los rangos de las variables, quedando establecidos de la siguiente manera:

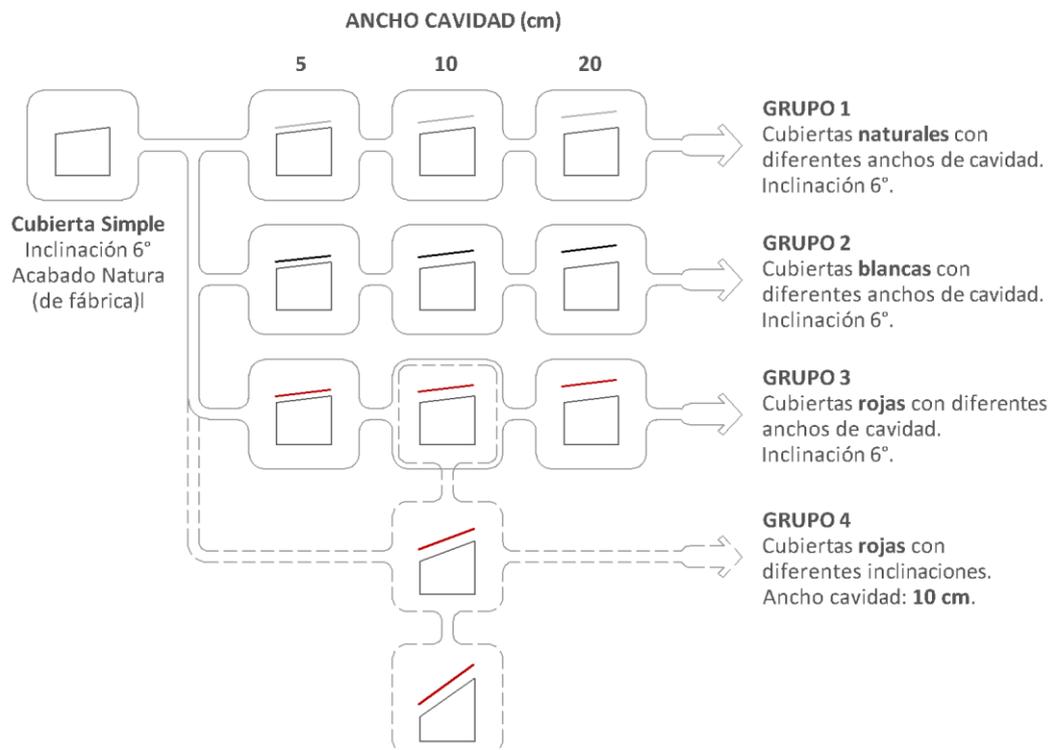
- Separación libre entre las láminas (Anchura cámara): 5, 10 y 20 cm.
- Color del acabado superficial: blanco, lámina metálica al natural y rojo óxido.
- Inclinación: 6° (10%), 21° (38%) y 36° (73%).

Una vez establecidas las variables de configuración y sus valores se determinó el número y características de los casos a medir mediante un diseño experimental factorial, el cual permitió estudiar el efecto simultáneo de las variables de diseño sobre el flujo de energía por la cubierta (Peña Núñez, 2011). En el caso del presente se realizó un diseño factorial completo para dos de las variables de estudio: anchura de la cámara y color del acabado superficial como se muestra en la Figura 3.

A fin de evaluar la inclinación de la cubierta se fijó la anchura de la cámara en 10 cm y la reflectancia del acabado superficial usando pintura color rojo óxido, por ser los rangos con mayores registros de velocidad de aire al interior de la cámara en las simulaciones (Escobar Ruiz, 2013).

En total se analizaron 11 prototipos de cubiertas ventiladas y un prototipo base de cubierta metálica simple al natural con un máximo de 4 modelos monitoreados simultáneamente (3 cubiertas ventiladas y un prototipo base) para obtener la variación neta del flujo de energía a través de la cubierta al implementar la cubierta ventilada en sus diferentes configuraciones (Banionis et al., 2012).

Figura 3. Descripción de las características de los grupos de cubierta ventilada analizadas



Fuente: Elaboración propia.

### 2.3 Descripción de los prototipos

El desarrollo del estudio requirió la fabricación de 4 estructuras, de 0,86 m x 2,00 m x 1,50 m, con cubiertas metálicas inclinadas hacia el sur, que permitieran registrar la temperatura superficial de sus techumbres y las del aire interior. Para establecer las dimensiones mínimas de los prototipos se consideró que éstas permitiesen el acceso de una persona en su interior para manipular los instrumentos de medición adecuadamente, esto es: instalación de los sensores de medición, así como carga y descarga de la información de los registradores de datos.

Debido a que los fenómenos térmicos no son escalables, el estudio se basa en un análisis de las tendencias de comportamiento de diferentes configuraciones de cubierta ventilada instaladas en espacios de pequeñas dimensiones (Liberati et al., 2009; Tépoix et al., 2008). Es decir, aunque las temperaturas registradas en los prototipos pueden no necesariamente corresponder a las de espacios habitados de dimensiones habituales, se puede considerar que una disminución significativa de las temperaturas registradas en los prototipos de cubierta ventilada estudiados con respecto al del de cubierta simple, significa un mejor comportamiento de la cubierta ventilada.

Por otro lado, disminuciones de temperatura entre los prototipos de cubierta ventilada con diferentes configuraciones hacen posible evaluar el grado de incidencia de cada una de las variables de diseño en la disminución del flujo de energía a través de las cubiertas ventiladas.

En cuanto a la ubicación de los prototipos de cubiertas, se buscó una localización relativamente alta respecto a las edificaciones circundantes para evitar obstrucciones de viento y radiación que pudieran influir en las mediciones tanto de los prototipos como de la estación meteorológica (Figura 4).

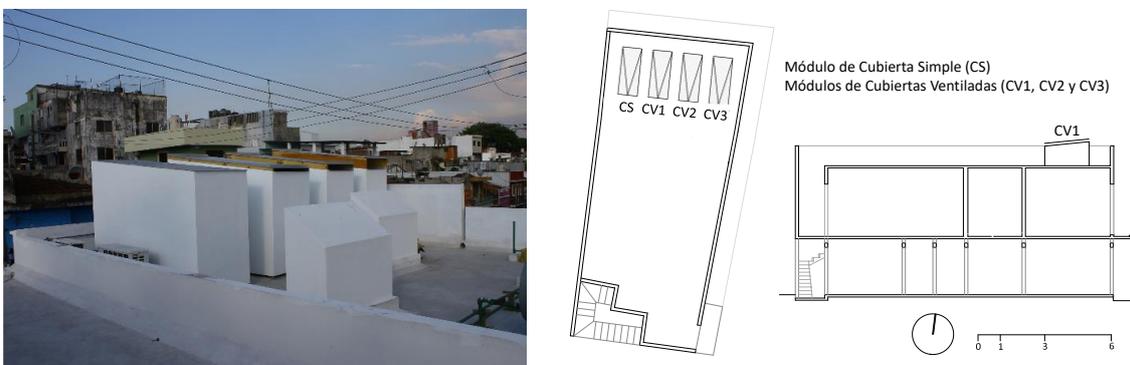
- *Prototipo Base:*

El prototipo está formado por una estructura fabricada con perfiles metálicos galvanizados rectangulares de 2,5 cm x 2,5 cm

A dicha estructura se fijaron paneles de yeso de 13 mm de espesor en sus caras interior y exterior para conformar los muros. Para el piso se utilizó un tablero contrachapado de madera de 12 mm de espesor apoyado sobre un bastidor de perfiles de acero angular de 2.5 cm soldado a la estructura principal.

En la cara exterior de los cerramientos, se reforzaron las juntas entre paneles con malla de fibra de vidrio y finalmente se recubrieron con una mezcla de cemento portland y resinas poliméricas para evitar filtraciones al interior. Al final se aplicó una pintura acrílica blanca para obtener una alta reflectancia de la superficie exterior disminuyendo así la transmisión de energía por los muros y minimizar la repercusión de las diferencias de la incidencia solar en los prototipos de los extremos este y oeste (Figura 4)

Figura 4. Emplazamiento de los prototipos de cubiertas en el sitio



Fuente: Elaboración propia.

La lámina galvanizada de 0,95 mm de espesor se fijó directamente a la estructura metálica, con una pendiente a un agua de 6° inclinada hacia el sur, ya que se considera la orientación con mayor captación de radiación solar.

- *Prototipos de cubierta ventilada con diferentes anchuras de cámara:*

Los 3 prototipos de cubierta ventilada tienen el mismo sistema constructivo, dimensiones e inclinación que el prototipo base. La cubierta también está formada por láminas galvanizadas de 0,95 mm de espesor. La hoja exterior se fijó directamente a la estructura metálica y la hoja interior se fijó a 2 vigas de madera en los extremos longitudinales, evitando puentes térmicos, creándose entre ambas una cámara de aire ventilada.

Para evaluar el efecto de la cámara de aire, las vigas de madera de 5 cm, 10 cm y 20 cm de altura se eligieron acorde a las dimensiones de las distintas cámaras a estudiar. Las aberturas de las cámaras se orientaron hacia el norte y hacia el sur, en los puntos más altos y más bajos respectivamente, dejando la cámara libre de cualquier obstrucción al paso del aire.

- *Prototipos de Cubierta ventilada con diferentes reflectancias:*

Para la evaluación de la incidencia del acabado superficial de la hoja metálica exterior en el flujo de energía y su repercusión en el sobrecalentamiento del espacio interior se partió de los tres prototipos anteriores, a los que se modificó el acabado superficial, manteniéndose la inclinación de 6° hacia el sur del prototipo base.

Se seleccionaron tres acabados superficiales: 1) Lámina galvanizada con acabado de fábrica (emitancia: 0.23; reflectancia: 0.61), 2) Lámina galvanizada con pintura acrílica blanca (emitancia 0.8; reflectancia: 0.85) y 3) Lámina galvanizada con Pintura Rojo Óxido acabado mate (emitancia 0.9; reflectancia: 0.17). (Heat Island Group, 2022; Perry & Green, 1997)

El objetivo de esta elección fue conocer el comportamiento térmico de la lámina metálica 1) recién instalada, sin suciedad, óxido o polvo que pudieran aumentar su absorbancia térmica, 2) con un acabado de alta reflectancia y, por último, 3) conocer su comportamiento cuando la falta de mantenimiento del acabado superficial permitiese la aparición de óxido. Se considera que, dicho comportamiento sería el que se podría observar a lo largo de la vida útil del acabado superficial de una cubierta metálica.

Una vez construidos los 3 prototipos de Cubierta ventilada descritos, todos con la inclinación de 6° propuesta para el prototipo base y con las diferentes dimensiones de cámara (5-10-20), se procedió a la monitorización de las temperaturas superficiales y del aire con los distintos acabados exteriores (1-2-3).

- *Prototipos de Cubierta ventilada con diferentes inclinaciones:*

Una vez registrados los datos de los casos anteriores se modificó el prototipo para evaluar la incidencia de la inclinación de la cubierta (6°, 21° y 36°) en la disminución de flujo de energía, y por tanto en el sobrecalentamiento del espacio interior. Los cambios de inclinación, siempre hacia el sur, se hicieron sobre el prototipo con cámara de 10 cm y color rojo óxido.

El estudio de esta variable parte del supuesto que una mayor inclinación facilitaría el movimiento del aire por flotabilidad térmica, permitiendo una mayor evacuación de calor al exterior.

Para garantizar la conservación de un mismo volumen de aire interior para todas las pruebas independientemente del grado de inclinación de la cubierta se diseñó un sistema de ensamblaje que permitió realizar las modificaciones de manera rápida y sencilla.

Las hojas metálicas de las cubiertas se instalaron sobre bastidores intercambiables de diferentes longitudes, correspondientes a las distintas variaciones del ángulo de inclinación. Dichos bastidores se apoyaron sobre un eje de rotación de la estructura base, lo cual permitió la adecuada calibración del ángulo de inclinación deseado sin afectar las medidas de referencia del prototipo.

Mediante extensiones a las paredes norte, retirando secciones de muro de la pared sur y añadiendo secciones triangulares de los muros laterales fue posible obtener las 3 diferentes inclinaciones (6°, 21° y 36°) de las cubiertas ventiladas a estudiar, pudiendo regresar en cualquier momento a la configuración anterior (Figura 5 y Figura 6).

Figura 5. Cambio en la configuración de los prototipos para las diferentes inclinaciones de las cubiertas ventiladas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Fotografía de los prototipos del Grupo 4, con diferentes inclinaciones



Fuente: Elaboración propia.

## 2.4 Adquisición de datos

Para comparar el comportamiento térmico de las cubiertas ventiladas al modificar las variables frente a la cubierta simple con acabado natural, se registraron los siguientes datos (Figura 7).

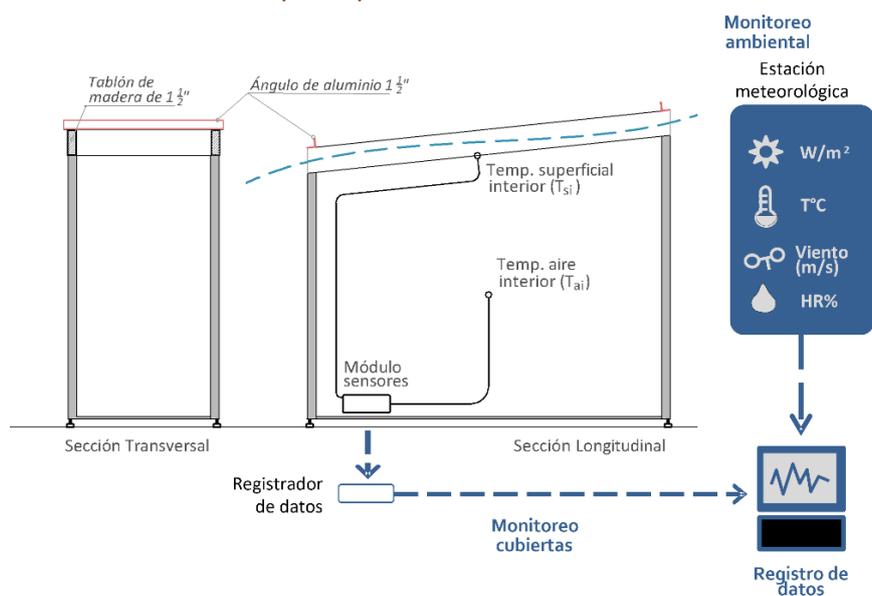
De los sensores ubicados en los prototipos:

- Temperatura superficial interior de la cubierta. ( $T_{si}$ )
- Temperatura de aire interior del espacio cubierto de cada uno de los prototipos ( $T_{ai}$ )

De los sensores de la estación meteorológica:

- Temperatura exterior de bulbo seco
- Radiación solar
- Humedad relativa
- Velocidad del viento
- Dirección del viento

Figura 7. Ubicación de los sensores para el registro de temperaturas de los prototipos de Cubierta ventilada



Fuente: Elaboración propia.

El registro de las temperaturas del prototipo base se realizó a lo largo de todo el periodo que duró la experimentación (22/08/2015-02/02/2016), para tener en todo momento la referencia para cada uno de los grupos de prueba.

Para obtener las temperaturas de los diferentes puntos de medición se colocaron sensores LM35 (Texas Instruments, 2017) adheridos a la cara interna de las hojas metálicas interiores por medio de cinta de aluminio auto adherible y grasa disipadora de calor para mejorar el contacto entre el sensor y la superficie. También se colocaron sensores LM35 para registrar la temperatura del aire, suspendiéndolos en el centro geométrico del espacio interior de los prototipos; evitando el contacto directo con las superficies alrededor (Figura 8).

Figura 8. Fotografías de la ubicación de los sensores dentro de los prototipos y tipo de fijación



Fuente: Elaboración propia.

Debido a la monitorización secuencial de los prototipos de cubierta ventilada, la instalación de una estación meteorológica en su entorno era fundamental para poder interpretar correctamente los datos obtenidos.

El registro de las condiciones climáticas durante el estudio se realizó con la estación meteorológica alámbrica: Davis VantagePro2 6152C (Davis Instruments Corporation, 2020), incorporando un sensor de radiación solar: Davis 6450 (Davis Instruments Corporation, 2014), así como sus accesorios de montaje. Además, se utilizó un dispositivo de comunicación de la estación con la computadora y el software: WeatherLink Computer (Davis Instruments Corporation, 2021). Con esta estación meteorológica fue posible el registro de: temperatura de bulbo seco, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento del sitio de estudio.

El monitoreo de las temperaturas superficiales de las cubiertas y del aire interior de los prototipos se realizó con un sistema de adquisición de datos integrado por tres elementos: dos módulos con 8 sensores de temperatura LM35 cada uno (16 en total); un registrador de datos con contador de tiempo real (RTC); una pantalla LCD y una memoria SD para almacenamiento de datos. Los módulos transmisores se conectaron a un microcontrolador ATMEGA32 con una interfaz RS485 al registrador de datos. Para su funcionamiento, el registrador adquiere la señal de ambos módulos solicitando minuto a minuto la información de los módulos, misma que se registra en la memoria SD alojada en él. La Información se descargó regularmente en hojas de cálculo para su posterior análisis.

## 2.5 Criterio de comparación y tratamiento de datos

Para evaluar el comportamiento simultáneo de las temperaturas de los prototipos de cubierta ventilada de cada grupo de estudio, se identificaron los días con registros continuos de los

instrumentos de medición para la fracción del periodo analizado correspondiente al grupo en cuestión. Posteriormente, se graficaron las temperaturas de los diferentes puntos de análisis (temperatura superficial de la hoja interior de la cubierta y temperatura del aire interior de los prototipos), lo cual permitió observar su comportamiento con respecto a la radiación solar y a la temperatura del aire exterior registrada por la estación meteorológica para ese mismo día en un lapso de 24 horas. De forma paralela se graficaron las temperaturas superficiales y del aire interior del prototipo base de cubierta simple, que sirvió de referencia para el análisis de cada uno de los grupos de estudio.

Para poder comparar los resultados fue preciso elegir días con condiciones climatológicas similares que permitiesen realizar la comparación de resultados entre ellos, debido a que las mediciones se llevaron a cabo en un periodo de más de 5 meses, en los que se monitorearon los diferentes grupos de prueba en forma sucesiva. Para ello, se calculó la temperatura acumulada ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ) y la radiación acumulada de los días de estudio, las cuales se obtuvieron sumando los registros de radiación ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) y temperatura de bulbo seco ( $^{\circ}\text{C}$ ) del promedio de cada hora, de la siguiente forma:

- Radiación acumulada ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ ) =  $R_{1h} + R_{2h} + \dots R_{24h}$
- Temperatura acumulada ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ) =  $T_{1h} + T_{2h} + \dots T_{24h}$

Con los valores de radiación y temperatura acumulada de los días de estudio registrados fue posible seleccionar aquellos con niveles de radiación y temperatura del aire exterior que permitiesen establecer un punto de comparación del comportamiento entre los diferentes grupos, a pesar de haberse medido en diferentes periodos del año.

Debido a que el comportamiento de las temperaturas es muy variable a lo largo del día, y para evaluar con mayor claridad el comportamiento de las mismas, se procedió a obtener las diferencias de temperatura entre los puntos de medición y la temperatura del aire exterior de los días de comparación seleccionados.

Este análisis permitió identificar aquellas configuraciones de cubierta ventilada que lograron una menor diferencia de temperatura, independientemente de la temperatura del aire exterior registrada en los días de comparación seleccionados para cada grupo.

De tal forma que, obtenido el promedio de la temperatura de los prototipos alcanzado para cada hora ( $T_n$ ) y habiendo sustraído el promedio de la temperatura de bulbo seco de la hora en cuestión ( $T_{ae}$ ) se obtuvieron los  $^{\circ}\text{C}$  de calentamiento del punto de medición estudiado ( $T_n - T_{ae}$ ) con respecto a la temperatura del aire exterior para la hora estudiada.

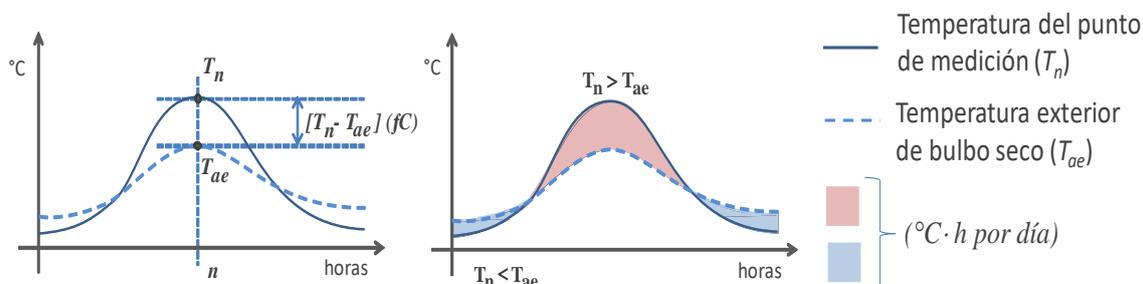
Posteriormente se realizó la sumatoria de esta diferencia para todas las horas del día, distinguiendo los valores positivos de los negativos. En la Figura 9 se puede observar un gráfico con el área marcada en rojo cuando la temperatura del punto de medición fue mayor a la del aire exterior (diferencia positiva) y el área marcada en azul, cuando la temperatura del punto de medición fue menor a la del aire exterior (diferencia negativa).

Los valores de las operaciones realizadas se obtienen en  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ , la cual es una unidad análoga a los grados día de enfriamiento y calefacción (Cooling Degree Day, Heating Degree Day)(Bromley, 2023) . Gracias a este término es posible identificar cuantos grados y durante cuántas horas ha estado la temperatura exterior por debajo o por encima de la temperatura registrada en los diferentes puntos de medición (ATECYR, 2014). Esta métrica nos permite hacer una comparación porcentual de las diferentes configuraciones (Pérez-Tello et al., 2018).

Este análisis se realizó para cada uno de los prototipos de los grupos de prueba, incluyendo el de cubierta simple de hoja metálica al natural que sirvió como punto de referencia para establecer la efectividad de la configuración de cada uno de los prototipos.

Un tratamiento de datos similar podría resultar de utilidad en estudios de edificaciones naturalmente ventiladas, donde la temperatura del aire exterior es siempre muy cercana a la del aire interior (Kabre, 2010) con lo cual, aun logrando disminuir el calentamiento de la cubierta, ésta difícilmente podría alcanzar temperaturas menores a las del aire exterior.

Figura 9. Criterio para el cálculo de la sumatoria de diferencias de temperatura con respecto a la temperatura del aire exterior para la evaluación del comportamiento de los diferentes puntos de medición de las cubiertas metálicas



Fuente: Elaboración propia.

### 3. Selección de datos

El monitoreo de los grupos de estudio (Figura 3) utilizados para el presente análisis se desarrolló durante los meses de agosto de 2015 a febrero de 2016 como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Periodos de medición del los diferentes grupos de estudio

Grupo de estudio	Inicio mediciones	Final de mediciones
Grupo 1	22 de agosto de 2015	2 de septiembre de 2015
Grupo 2	4 de septiembre de 2015	21 de septiembre de 2015
Grupo 3	10 de octubre de 2015	31 de octubre de 2015
Grupo 4	19 de noviembre de 2015	02 de febrero de 2016

Fuente: Elaboración propia.

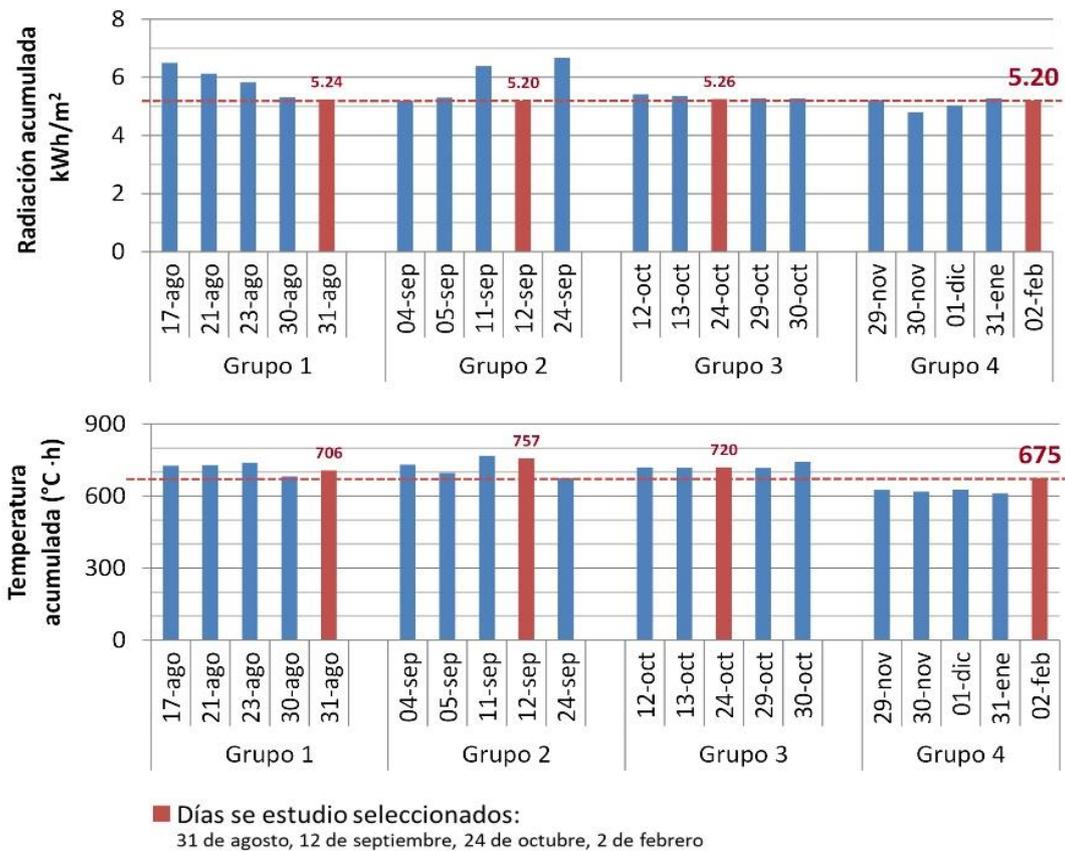
Los periodos de tiempo dedicados a cada grupo de estudio corresponden a los días requeridos para obtener la mayor cantidad de registros de 24 horas ininterrumpidas de los instrumentos con días soleados. Al término de cada periodo de mediciones se llevaron a cabo las modificaciones necesarias de los prototipos de cubiertas para realizar las pruebas del siguiente grupo.

A continuación, se muestran los resultados del análisis de los días de estudio para elegir los días de comparación utilizados para realizar las evaluaciones de las variables de configuración de las cubiertas ventiladas metálicas de cada grupo de estudio.

Como se explicó en el apartado anterior, se obtuvieron los valores acumulados de temperatura del aire exterior y radiación. Posteriormente, se identificaron aquellos con valores cercanos entre sí.

En la Figura 10 se representa una muestra de los días de estudio y el criterio de selección de los días de comparación para el análisis de temperaturas de los prototipos medidos. Con dicho criterio, se seleccionaron los días con menores diferencias de radiación acumulada y temperatura acumulada del aire exterior entre los diferentes periodos de medición, indicados en rojo.

Figura 10. Radiación solar acumulada y temperatura acumulada del aire exterior de algunos de los días de estudio para cada grupo de prototipos de cubiertas



Fuente: Elaboración propia.

#### 4. Resultados y discusión

Del análisis de las mediciones realizadas a los diferentes grupos de cubiertas, descritos en el apartado 2.2 Definición de las variables, se desprenden las siguientes observaciones:

##### 4.1 Grupo 1. Cubiertas con acabado natural y diferentes anchos de cámara

Como resultado del monitoreo realizado a los prototipos del Grupo 1, es decir, las cubiertas metálicas al natural, se pudieron observar los siguientes resultados (Figura 11).

En primer lugar, se observa una disminución de hasta 39°C de temperatura superficial interior de las cubiertas ventiladas respecto a la temperatura superficial interior de la cubierta simple (Figura 11, a).

Se registraron temperaturas de hasta 79°C para dicho prototipo en los momentos de mayor radiación, que para el día de comparación (31 de agosto de 2015) fue de 880 W/m<sup>2</sup>. Para los prototipos de 5 y 20 cm de cámara, la temperatura superficial registrada fue de y de 43°C y 40°C respectivamente (Figura 11, a).

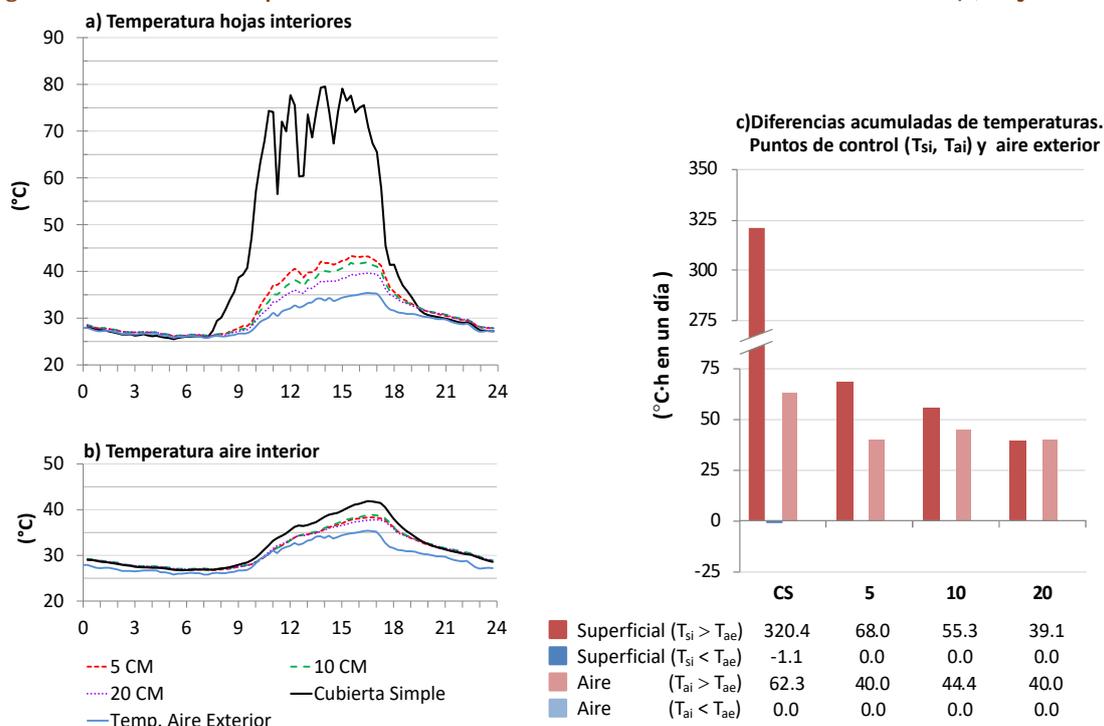
En segundo lugar, se observó una diferencia de hasta 4.1 °C en la temperatura del aire interior de los prototipos de cubierta ventilada con relación al registro máximo de temperatura del aire interior del

prototipo base, que fue de 41.9°C. Los registros de temperatura para los prototipos de 5 y 20 cm de cámara fueron de 38.8 °C y 37.8°C respectivamente, en la misma hora del día. (Figura 11, b)

Respecto al comportamiento de la temperatura de los puntos de medición de los diferentes prototipos de cubierta ventilada, se observó una disminución de la temperatura superficial de la hoja interior de las cubiertas cuando se aumentó la distancia entre las hojas metálicas. Es decir, una disminución de hasta 4°C de temperatura superficial de la hoja interior en las horas de mayor radiación entre el prototipo de cubierta ventilada de 20 cm con respecto al de 5 cm (Figura 11, a). Mientras que los registros de temperaturas del aire interior de los prototipos ventilados presentan variaciones de apenas 0.6°C entre ellos al modificar esta variable (Figura 11, b).

Por otro lado, en la comparación de °C·h en un día de la temperatura superficial interior de los prototipos analizados, se observa una disminución de entre un 80% y un 90% entre el prototipo base y los prototipos de cubierta ventilada; mientras que, en relación a las temperaturas de aire interiores, las diferencias en °C·h en un día son menos acusadas, encontrándose disminuciones de temperatura de entre 18 y 22 °C·h en un día entre las temperaturas acumuladas del aire interior de los prototipos con cubierta ventilada y las del prototipo de cubierta simple, con 62°C·h en un día del prototipo de cubierta simple, contra 40°C·h en un día de los prototipo de 5 y 20 cm de cámara (Figura 11, c).

Figura 11. Resultados Grupo 1. Láminas Naturales con diferentes anchuras de cámara (5, 10 y 20 cm)



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2 Grupo 2. Cubiertas blancas con diferentes anchuras de cámara

En el registro de temperaturas realizado a los prototipos del Grupo 2, es decir, las cubiertas ventiladas metálicas con acabado de pintura acrílica blanca, se pudo observar una disminución de la temperatura superficial de la hoja interior de las cubiertas ventiladas con respecto a la temperatura superficial de la cubierta metálica simple, con acabado natural, de alrededor de 45°C en sus registros máximos (Figura 12, a).

Respecto a la temperatura del aire interior de los prototipos, las cubiertas ventiladas registraron temperaturas de alrededor de 40.2 °C, 3.3°C menores a las del prototipo base (Figura 12, b).

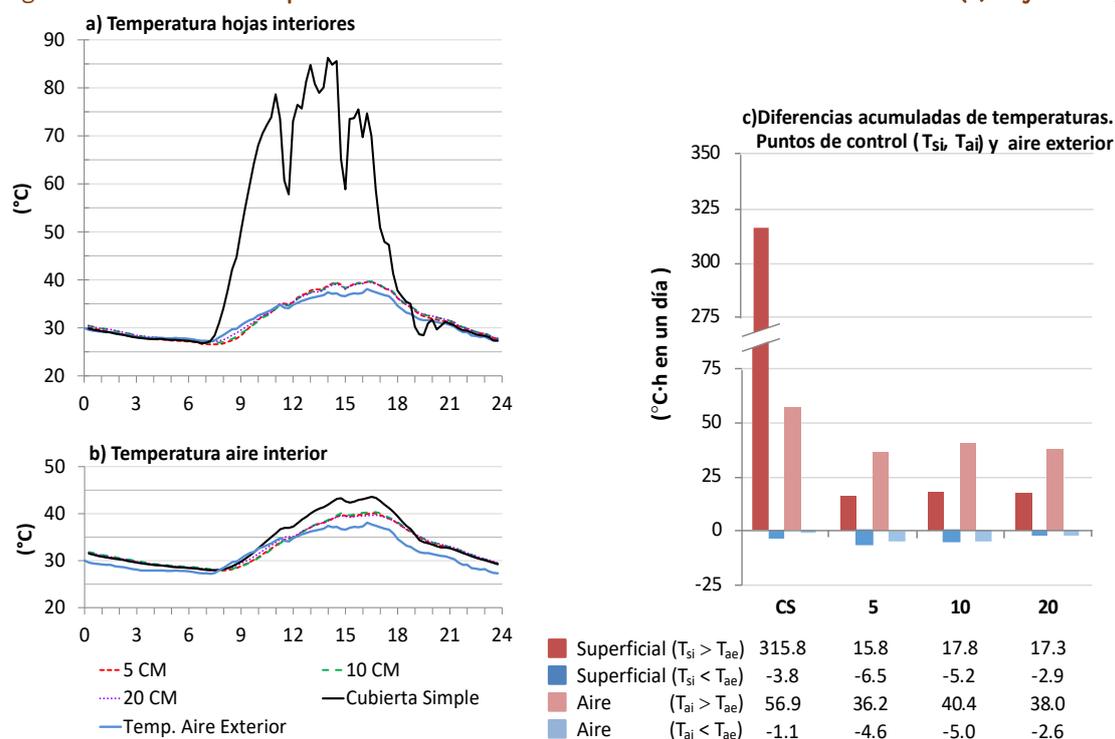
En cuanto al comportamiento de las temperaturas acumuladas de los prototipos se encontró que al aplicar el acabado blanco a la hoja exterior de la cubierta ventilada la disminución de la temperatura acumulada de la hoja interior fue del 95% para todas las anchuras de cámara ventilada, y de hasta un 35% para las temperaturas acumuladas del aire interior.

Es decir, se registró una diferencia de 273°C·h en un día, entre la temperatura acumulada superficial del prototipo de cubierta simple con acabado natural y la temperatura acumulada de las hojas interiores de las cubiertas ventiladas, y una diferencia de 20°C·h en un día de las temperaturas acumuladas del aire interior del prototipo de referencia de cubierta simple con acabado natural y las temperaturas acumuladas de las cubiertas ventiladas blancas. (Figura 12, c).

La diferencia en la anchura de la cámara de las cubiertas ventiladas cuando se aplicó la pintura blanca a la hoja externa no afectó en ninguna forma el comportamiento térmico de los prototipos, registrando todos ellos prácticamente las mismas temperaturas en los puntos de medición para todos los prototipos de 5, 10 y 20 cm de cámara, con 40°C de temperatura en la hora de mayor radiación del día de comparación (12 de septiembre de 2015), tanto para los registros de temperatura superficial interior de las cubiertas como para los de temperatura del aire interior de los prototipos.

Además, se observó que las temperaturas registradas fueron en general muy cercanas a la temperatura del aire exterior. En los registros de temperatura de la hoja interior de las cubiertas ventiladas se pudo observar una diferencia máxima de 1.5°C con respecto al aire exterior para la hora de mayor radiación solar, mientras que la temperatura del aire interior registró diferencias de hasta 3.5°C con respecto al aire exterior (Figura 12, b).

Figura 12. Resultados Grupo 2. Láminas blancas con diferentes anchuras de cámara (5, 10 y 20 cm)



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, es importante destacar que, para las primeras horas de la mañana, tanto las temperaturas superficiales de la hoja interior, como las del aire interior de los prototipos de cubierta ventilada blanca presentaron registros hasta 2°C menores a los de la temperatura del aire exterior, con lo cual, en el análisis de diferencias de temperaturas acumuladas, se pudo observar un aumento de esta diferencia en las hojas interiores de las cubiertas ventiladas, con  $-6.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h en un día}$  contra  $-3.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{h en un día}$  del prototipo de cubierta simple natural. Y para el aire interior de los prototipos de cubiertas ventiladas blancas se obtuvieron registros de  $-5$  y  $-2.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{h en un día}$  contra  $-1.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{h en un día}$  del prototipo de una sola hoja natural (Figura 12, c).

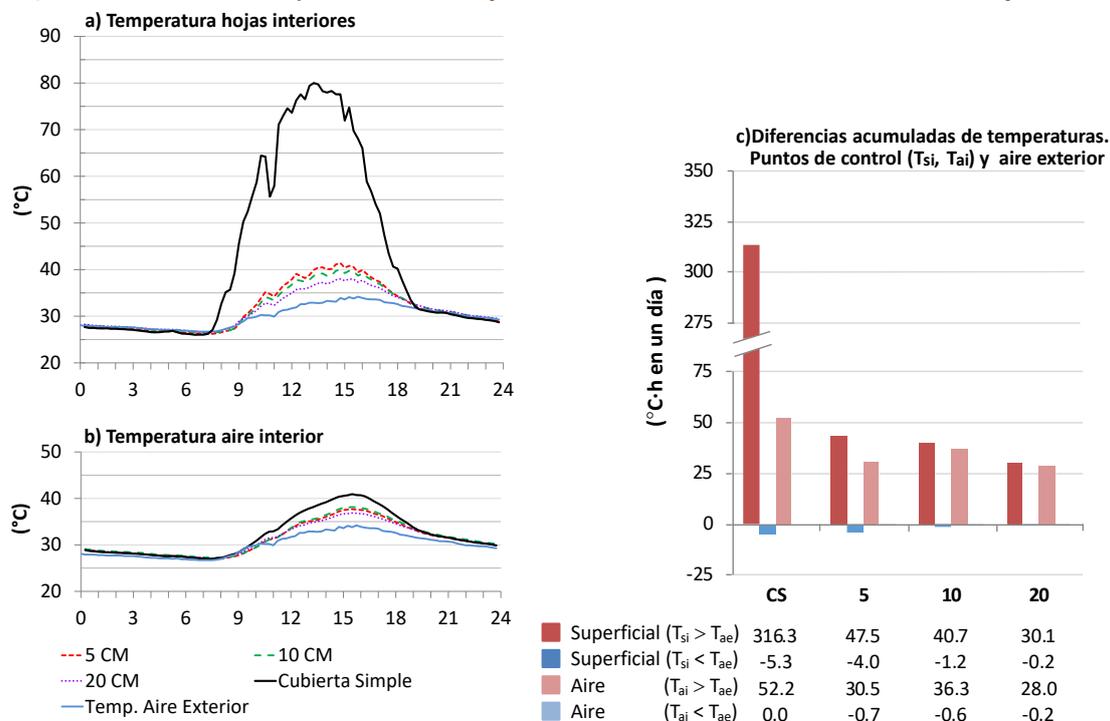
### 4.3 Grupo 3. Cubiertas rojas con diferentes anchos de cámara

En el análisis realizado a las temperaturas de las cubiertas ventiladas del Grupo 3, se observa una diferencia de alrededor de 40°C entre la temperatura superficial máxima del prototipo de cubierta simple natural y las temperaturas máximas superficiales de la hoja interior de las cubiertas ventiladas con acabado superficial exterior rojo óxido. Se observa una diferencia de 3°C entre la más caliente, de 5 cm de anchura de la cámara; y la menos caliente, con 20 cm de cámara (Figura 13-a).

En cuanto a las temperaturas del aire interior, se observa una diferencia de 3.5°C de las cubiertas ventiladas con respecto al prototipo de cubierta simple, y una diferencia de 1.5 °C entre la cubierta de 10 cm de anchura y la de 20 cm (Figura 13, b).

Esta tendencia puede apreciarse también en el análisis de diferencias de temperaturas acumuladas de los diferentes puntos de control de los prototipos (Figura 13, c), en donde se aprecia una disminución de  $286.2^{\circ}\text{C}\cdot\text{h en un día}$  de la temperatura superficial acumulada de la cubierta ventilada de 20 cm respecto a la del prototipo base, y de hasta  $24.2^{\circ}\text{C}\cdot\text{h en un día}$  en la temperatura acumulada del aire interior. No se observaron comportamientos claramente diferenciables entre los prototipos del Grupo 3 y los del Grupo 1.

Figura 13. Resultados Grupo 3. Láminas Rojas con diferentes anchuras de cámara (5, 10 y 20 cm)



Fuente: Elaboración propia.

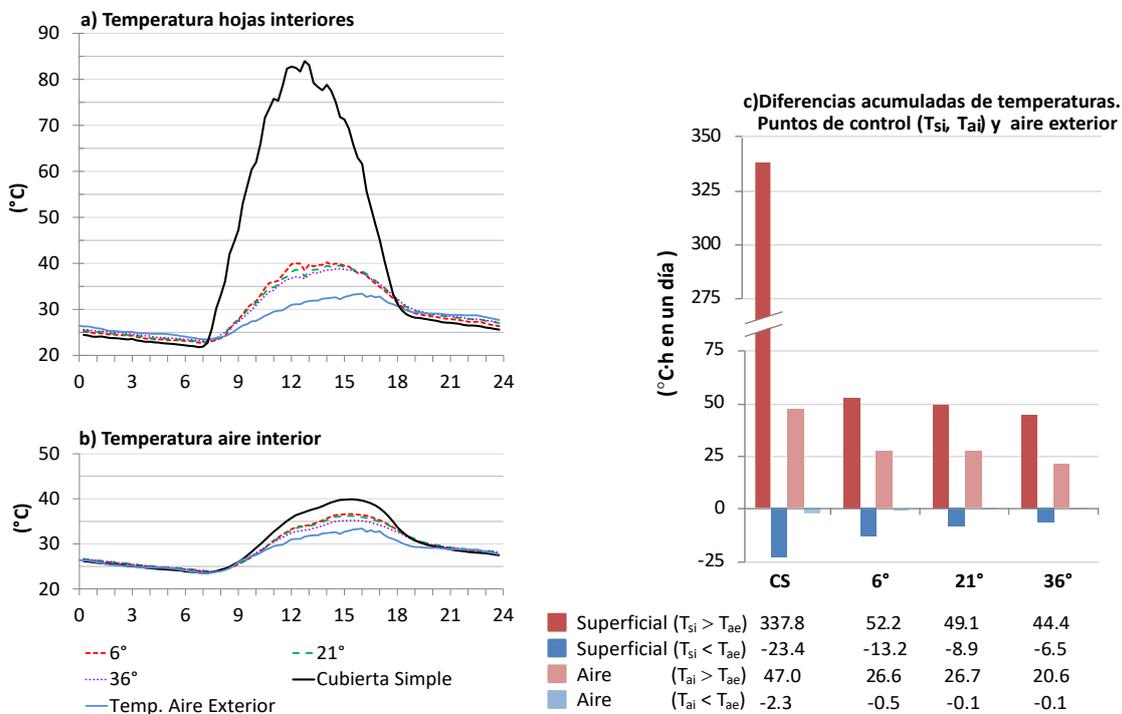
#### 4.4 Grupo 4. Cubiertas ventiladas rojas con diferentes inclinaciones

Al comparar los registros de los prototipos del Grupo 4, de cubiertas ventiladas con diferentes inclinaciones, se pudo observar, en el periodo de mayor radiación del día de comparación seleccionado (2 de febrero de 2016), un ligero aumento de la temperatura para la hoja interior de la cubierta ventilada con 6° de inclinación respecto a las cubiertas de 21° y 36°, siendo esta diferencia de apenas 3°C entre la cubierta más fría, con 37 °C , correspondiente a los 36° de inclinación; y la más caliente, con 40 °C correspondiente a los 6° de inclinación (Figura 14, a).

De forma opuesta, al cesar la radiación solar, se observan registros de temperatura menores en la hoja interior de las cubiertas a medida que la inclinación disminuye. Se registraron temperatura de 27.3 °C para la cubierta con 36° de inclinación y de 26.5 °C para la cubierta con 6°, cerca de la media noche del día de comparación seleccionado.

Una explicación para este fenómeno puede encontrarse en el comportamiento del movimiento del aire al interior de las cámaras. En algunos estudios se ha reportado que el parámetro que más influye en el aumento de la velocidad del aire por la cámara es la velocidad del viento exterior (Chang et al., 2008). Es decir, una disposición de la cámara que oponga una menor resistencia a la circulación del viento exterior puede permitirle disipar una mayor cantidad de calor, a diferencia de las cubiertas más inclinadas. Y es sólo cuando la intensidad de la radiación solar es significativamente más intensa (al medio día), cuando este fenómeno es revertido, ya que es precisamente la cubierta menos inclinada, la que recibe la mayor cantidad de radiación solar a la hora en que los rayos del sol inciden de manera más vertical en la latitud estudiada. Otra explicación podría encontrarse en que la disposición más horizontal de la cubierta le permite además realizar de manera más efectiva la refrigeración por radiación a la bóveda celeste al ocultarse el sol. Estas observaciones, aunque poco significativas, arrojan datos interesantes que permiten reconsiderar la conveniencia de inclinar la cubierta ventilada.

Figura 14. Resultados Grupo 4. Láminas Rojas con cámara de 10 cm y diferentes inclinaciones (6, 21 y 36°)



Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de las temperaturas del aire interior de los prototipos para el Grupo 4 es similar al de la hoja interior. Las temperaturas del aire interior de los prototipos presentan una ligera disminución cuando la inclinación aumenta, con registros de 36.6 °C en el prototipo con 6° de inclinación y 35.2 °C en el de 36° de inclinación (Figura 14, b).

Las diferentes inclinaciones de las cubiertas reportaron datos poco significativos en el análisis de las diferencias de temperaturas acumuladas para el aire interior de los prototipos, sin embargo, se observa una diferencia de 6°C·h en un día entre el prototipo de 36° de inclinación (con 20.6°C·h en un día) y los de 6° y 21° de inclinación (con 26.6°C·h en un día) como se observa en la Figura 14, c.

#### 4.5 Comparación entre grupos

Las siguientes tendencias de comportamiento pueden observarse de la comparación entre los diferentes grupos de estudio. Al respecto, es importante señalar que, aunque la metodología de análisis utilizada pretende aislar el efecto de las variables de configuración de las cubiertas ventiladas respecto a las variables climatológicas, se debe considerar que otros elementos climáticos, como la humedad y la intensidad del viento, pueden afectar su comportamiento térmico a pesar de la metodología implementada. En términos generales, se observa que la configuración de una cámara ventilada en las cubiertas metálicas, presenta mayores diferencias en las temperaturas superficiales acumuladas interiores de las hojas metálicas en comparación con los registros de temperatura del aire interior de los prototipos para todos los grupos de estudio, como se observa en la Figura 15, con disminuciones de alrededor del 88% en las diferencias de temperatura acumulada para los registros de temperatura superficial de las láminas interiores, y de un 38% en promedio en la temperatura del aire respecto al prototipo base.

Incorporar un acabado superficial de alta reflectancia a las láminas galvanizadas de las hojas exteriores de las cubiertas permitió una importante disminución de la temperatura superficial interior aminorando en gran medida el efecto del cambio de anchura de la cámara ventilada (Figura 12, a).

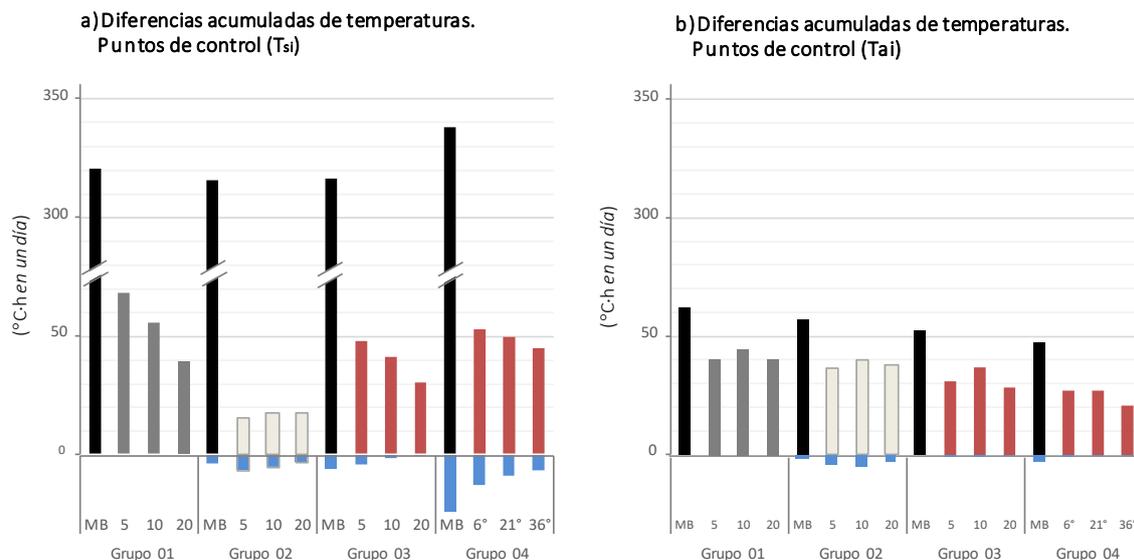
Como se puede observar en: Figura 11, Figura 13, Figura 13 y Figura 14; en todos los grupos de estudio, una vez los valores de radiación solar disminuyen, las temperaturas de los prototipos tienden a igualarse, tanto para los registros de temperatura superficial de la hoja interior, como para los del aire interior, siendo muy similares a las del aire exterior para el caso de las temperaturas superficiales de la cubierta y un poco mayores para los registros de temperatura del aire interior.

La capacidad de refrigeración radiativa nocturna de las cubiertas ventiladas queda de manifiesto al registrarse temperaturas inferiores a las del aire exterior en los periodos nocturnos. Debido a que los parámetros climáticos que participan en este tipo de refrigeración, tales como la humedad relativa del aire y la nubosidad de la bóveda celeste, no fueron analizados en el presente estudio, las observaciones solo permiten inferir que, aumentar la emisividad y reflectividad del acabado superficial de las láminas al aplicar pintura vinil-acrílica blanca, y reducir la anchura de la cámara ventilada, permitieron aumentar las diferencias negativas de temperatura superficial acumulada. (Figura 15, a); sin embargo, este aumento tiene un impacto poco significativo en las diferencias acumuladas negativas de temperatura del aire interior de los prototipos. (Figura 15, b)

La tendencia en la tasa de refrigeración nocturna de las cubiertas ventiladas estudiadas indicó mayor refrigeración en los prototipos con menor anchura de cámara, menor inclinación y mayor reflectancia del acabado superficial, en comparación con el prototipo base. (Figura 15).

El incremento de la capacidad de refrigeración radiativa nocturna de las cubiertas bajo esta configuración, se puede explicar ya que: 1) la inclinación de la cubierta es inversamente proporcional a su capacidad de remitir radiación a la bóveda celeste; 2) la proximidad de las hojas permite una mayor transferencia por radiación y convección de la energía, desde el espacio interior hacia el exterior; y, por último, 3) por el notable aumento de la emisividad de las láminas galvanizadas al cambiar el acabado superficial exterior de las cubiertas ventiladas por uno de alta reflectividad solar.

Figura 15. Comparación entre grupos



## 5. Conclusiones

Gracias al análisis del monitoreo a los prototipos de cubierta ventilada se pudo llegar a las siguientes conclusiones con respecto al comportamiento térmico de sus variables de diseño y con ello, a la configuración más adecuada para evitar el flujo de energía hacia el espacio interior en el clima estudiado.

La variable que presentó una mayor repercusión en la temperatura superficial de la hoja interior de la cubierta ventilada fue la reflectancia del acabado superficial de la hoja exterior.

La cubierta ventilada con acabado de pintura vinil-acrílica blanca presentó una muy importante disminución de la temperatura superficial interior con respecto a la del prototipo de cubierta metálica simple, no quedando esta capacidad supeditada a la anchura de la cámara, ya que las tres cubiertas ventiladas pintadas de color blanco igualaron sus temperaturas en todos los puntos de medición.

Por otro lado, dentro de las variables de configuración de la cubierta ventilada se pudo constatar que una distancia mayor entre las hojas metálicas de las cubiertas ventiladas naturales y rojas, permitió un menor sobrecalentamiento de la hoja interior de la cubierta, con diferencias de 3.5 °C en promedio entre los prototipos de 5 y 20 cm de cavidad para los momentos del día con mayor radiación. Es decir, cuanto menor sea esta distancia mayor es el sobrecalentamiento presentado. En este sentido, la proporción entre la sección y la superficie de la cámara de la cubierta ventilada, podría ser un factor a considerar para establecer la distancia entre las hojas de la cubierta ventilada en edificios de grandes dimensiones.

Una mayor inclinación de la cubierta demostró conseguir un menor calentamiento superficial de su cara interior en los periodos de mayor radiación del día de estudio, con una diferencia de 3°C entre los registros de temperatura máximos de las cubiertas ventiladas de 36° y 6° de inclinación. El impacto de esta variable es el menos importante en comparación con las otras variables de estudio.

De acuerdo a los resultados arrojados en el estudio, podemos concluir que, en el diseño de cubiertas ventiladas metálicas, para disminuir el incremento de temperatura superficial de la hoja interior en los periodos del día con altos niveles de radiación solar, se debe, en primer lugar: garantizar un acabado con alta reflectancia solar (y alta emisividad infrarroja) de la hoja exterior; en segundo lugar,

umentar la distancia entre las hojas metálicas que conforman la cubierta; y en tercer lugar, aumentar la inclinación de la cubierta.

## Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i PID2020-116036RB-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y ha contado con el apoyo del Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) del Gobierno Mexicano. ACE\_52\_11811\_ESCOBAR\_ET\_AL

## Autoría

El primer autor ha conceptualizado, diseñado y llevado a cabo la investigación, analizado los datos y elaborado el texto y las figuras. El segundo, tercer y cuarto autor han dirigido la investigación, realizado revisiones y aportado comentarios conceptuales y referencias.

**Conflicto de intereses:** Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

## Bibliografía

- Acerotechos. (2022). *Cubiertas metálicas - Techos de lámina - Acerotechos*. <https://acerotechos.mx/cubiertas-metalicas-techos-de-lamina/>
- Afonso, C., & Oliveira, A. C. (2000). Solar chimneys: simulation and experiment. *Energy and Buildings*, 32, 71–79. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00038-9)
- ATECYR. (2014). Frecuencias horarias de repetición en temperatura. Intervalo 24 h. Guías IDAE 007 | IDAE. In *Colección de Ahorro y Eficiencia Energética en Climatización* (IDAE, Vol. 007, pp. 1–68). IDAE. [https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones\\_idae/documentos\\_guia\\_007\\_frecuencias\\_horarias\\_repeticion\\_en\\_temperatura\\_intervalo\\_24\\_h\\_a7945051.pdf](https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_guia_007_frecuencias_horarias_repeticion_en_temperatura_intervalo_24_h_a7945051.pdf)
- Auliciems, A., & Szokolay, S. V. (2007). Thermal comfort. In *Passive and Low Energy Architecture International. DESIGN TOOLS AND TECHNIQUES. Note 3* (p. 66). <https://www.plea-arch.org/wp-content/uploads/PLEA-NOTE-3-THERMAL-COMFORT.pdf>
- Banionis, K., Monstvilas, E., Stankevičius, V., Bliūdžius, R., & Miškinis, K. (2012). Impact of heat reflective coatings on heat flows through the ventilated roof with steel coatings. *Journal of Civil Engineering and Management*, 18(4), 505–511. <https://doi.org/10.3846/13923730.2012.700943>
- Barrios, G., Huelsz, G., Rojas, J., Ochoa, J. M., & Marincic, I. (2012). Envelope wall/roof thermal performance parameters for non-air-conditioned buildings. *Energy and Buildings*, 50, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.030>
- Bianco, V., Diana, A., Manca, O., & Nardini, S. (2018). Numerical investigation of an inclined rectangular cavity for ventilated roofs applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 426–435. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2018.02.016>
- Biwole, P. H., Woloszyn, M., & Pompeo, C. (2008). Heat transfers in a double-skin roof ventilated by natural convection in summer time. *Energy and Buildings*, 40(8), 1487–1497. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.004>
- Bromley, M. (2023). *Degree Days – An Introduction*. <https://www.degree-days.net/introduction>
- Černe, B., & Medved, S. (2007). Determination of transient two-dimensional heat transfer in ventilated lightweight low sloped roof using Fourier series. *Building and Environment*, 42(6), 2279–2288. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.04.022>

- Chang, P.-C., Chiang, C.-M., & Lai, C.-M. (2008). Development and preliminary evaluation of double roof prototypes incorporating RBS (radiant barrier system). *Energy and Buildings*, 40(2), 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.021>
- Ciampi, M., Leccese, F., & Tuoni, G. (2005). Energy analysis of ventilated and microventilated roofs. *Solar Energy*, 79(2), 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.08.014>
- Davis Instruments Corporation. (2014). *Solar Radiation Sensor Vantage Pro2™ Accessories*. <https://support.davisinstruments.com/article/85innuwzkh-spec-sheet-solar-radiation-sensor-specifications-6450>
- Davis Instruments Corporation. (2020). *Cabled Vantage Pro2™ & Vantage Pro2 Plus™ Stations* (Vol. 9454, pp. 1–8). Davis Instruments Corporation. <https://www.davisinstruments.com/products/cabled-vantage-pro2-plus-with-standard-radiation-shield>
- Davis Instruments Corporation. (2021). *Getting started guide. WeatherLink Data Loggers*. (Issue 7395.210, p. 19).
- Dimoudi, a., Androutsopoulos, a., & Lykoudis, S. (2006). Summer performance of a ventilated roof component. *Energy and Buildings*, 38(6), 610–617. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.09.006>
- Escobar Ruiz, V. (2013). *Parámetros de diseño de cubiertas ventiladas metálicas para clima cálido húmedo en Tabasco (tesina de máster)*. Universidad Politécnica de Cataluña. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/20604?show=full>
- Escobar Ruiz, V. (2018). La cubierta ventilada metálica en el clima cálido húmedo (tesis de doctorado). In *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. Universitat Politècnica de Catalunya. <http://www.tdx.cat/handle/10803/462099>
- Gagliano, A., Patania, F., Nocera, F., Ferlito, A., & Galesi, A. (2012). Thermal performance of ventilated roofs during summer period. *Energy and Buildings*, 49, 611–618. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.007>
- Givoni, B. (1969). *Man, Climate and Architecture*. Amsterdam, Países Bajos: Elsevier Publishing Company Limited.
- Heat Island Group. (2022). *Roof Coatings, White*. <https://heatisland.lbl.gov/resources/roof-coatings>
- Kabre, C. (2010). A new thermal performance index for dwelling roofs in the warm humid tropics. *Building and Environment*, 45(3), 727–738. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.017>
- Klein, O., & Schlenger, J. (2008). *Room conditioning*, Berlín, Alemania: Birkhäuser. <https://doi.org/10.1515/9783035612943>
- Kośny, J., Biswas, K., Miller, W., & Kriner, S. (2012). Field thermal performance of naturally ventilated solar roof with PCM heat sink. *Solar Energy*, 86(9), 2504–2514. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.05.020>
- Labat, M., Woloszyn, M., Garnier, G., Rusaouen, G., & Roux, J. J. (2012). Impact of direct solar irradiance on heat transfer behind an open-jointed ventilated cladding: Experimental and numerical investigations. *Solar Energy*, 86(9), 2549–2560. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.05.030>
- Lee, S., Park, S. H., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2009). An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof. *Building and Environment*, 44(7), 1431–1439. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.09.009>
- Li, D., Zheng, Y., Liu, C., Qi, H., & Liu, X. (2016). Numerical analysis on thermal performance of naturally ventilated roofs with different influencing parameters. *Sustainable Cities and Society*, 22(April), 86–93. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2016.02.004>
- Liberati, P., Spiga, M., & Zappavigna, P. (2009). Optimization of ventilated roofs for livestock housing. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(5), 432–437. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.01.023>

- Lima-Téllez, T., Chávez, Y., Hernández-López, I., Xamán, J., & Hernández-Pérez, I. (2022). Annual thermal evaluation of a ventilated roof under warm weather conditions of Mexico. *Energy*, 246, 123412. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.123412>
- Manca, O., Mangiacapra, A., Marino, S., & Nardini, S. (2014). Numerical Investigation on Thermal Behaviors of an Inclined Ventilated Roof. *Volume 2: Dynamics, Vibration and Control; Energy; Fluids Engineering; Micro and Nano Manufacturing*, 2, V002T09A017. <https://doi.org/10.1115/ESDA2014-20391>
- May Tzuc, O., Hernández-Pérez, I., Macías-Melo, E. V., Bassam, A., Xamán, J., & Cruz, B. (2019). Multi-gene genetic programming for predicting the heat gain of flat naturally ventilated roof using data from outdoor environmental monitoring. *Measurement*, 138, 106–117. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2019.02.032>
- Omar, A. I., Virgone, J., Vergnault, E., David, D., & Idriss, A. I. (2017). Energy Saving Potential with a Double-Skin Roof Ventilated by Natural Convection in Djibouti. *Energy Procedia*, 140, 361–373. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.149>
- Özdeniz, M. B., & Hançer, P. (2005). Suitable roof constructions for warm climates - Gazimäusa case. *Energy and Buildings*, 37(6), 643–649. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.09.008>
- Peña Núñez, M. Isabel. (2011). *Diseños de investigación en Psicología* (p. 82). <http://hdl.handle.net/2445/20322>
- Pérez-Tello, C., Campbell-Ramírez, H., Suástegui-Macías, J. A., & Reinhardt, M. S. (2018). Methodology of Energy Management in Housing and Buildings of Regions with Hot and Dry Climates. *HVAC System*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.78341>
- Don W. Green; Robert H. Perry (1997). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. Séptima edición. New York, Chicago, San Francisco, Lisboa, Inglaterra, Madrid, CDMX, Milan, Nueva Delhi, San Juan, Seúl, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071422949>
- Rawat, M., & Singh, R. N. (2022). A study on the comparative review of cool roof thermal performance in various regions. *Energy and Built Environment*, 3(3), 327–347. <https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2021.03.001>
- Serra Florensa, R. (1999). *Arquitectura y climas*. Barcelona, España: Editorial Gustavo Gili.
- Servicio Meteorológico Nacional. (2023). *Normales Climatológica por Estado*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=tab>
- Synnefa, a., Saliari, M., & Santamouris, M. (2012). Experimental and numerical assessment of the impact of increased roof reflectance on a school building in Athens. *Energy and Buildings*, 55, 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.044>
- Tépo, J. E. V., González-Cruz, E. M., & Mata, M. F. E. (2008). Cubiertas y estanques para optimizar el sistema pasivo de techo estanque metálico en clima cálido seco extremo: estudio experimental exploratorio. *Palapa*, 3, 43–54. <https://www.redalyc.org/pdf/948/94814746007.pdf>
- Ternium. (2018). *Aceros Recubiertos Información técnica* (pp. 1–28). <https://mx.ternium.com/media/z2bfy3ax/cat%C3%A1logo-ternium-aceros-recubiertos.pdf>
- Texas Instruments. (2017). *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors 1FEATURES DESCRIPTION* (p. 38). <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
- Tong, S., & Li, H. (2014). An efficient model development and experimental study for the heat transfer in naturally ventilated inclined roofs. *Building and Environment*, 81, 296–308. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.009>
- Torres-Quezada, J., Coch, H., & Isalgué, A. (2019). Assessment of the reflectivity and emissivity impact on light metal roofs thermal behaviour, in warm and humid climate. *Energy and Buildings*, 188–189, 200–208. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.022>