

Libro de Actas del 3^{er} Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones
Eco-Eficientes

17. Evaluación de la eficiencia energética de un tipo de “cubierta fría” para enfriamiento pasivo. Estudio comparativo entre un caso de clima tropical y un caso del Sur de España.

Domínguez Torres, Carlos A.⁽¹⁾, Domínguez Delgado, Antonio^(2,*)

(*) Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, domdel@us.es, 954556527

(1) Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla

(2) Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla

Resumen. Este trabajo se centra en la evaluación de la eficiencia energética de un tipo de Cubierta Fría bajo las condiciones climáticas habituales en el Sur de España y en el Norte de Colombia, durante todos los meses del año usando para ello los datos meteorológicos típicos mensuales.

Concretamente, se compara el comportamiento temodinámico de la Cubierta Fría con una cubierta estándar en los dos contextos geográficos y climáticos para los que puede ser adecuado el uso de aconsejar el uso de este tipo de técnicas.

Este tipo de cubiertas constituyen una innovadora y relativamente poco costosa técnica para reducir las exigencias energéticas de un edificio para su enfriamiento bajo altas temperaturas ambientales, como es el caso en verano para las regiones del sur de Europa, concretamente de España, o durante prácticamente todo el año en las regiones de clima ecuatorial tropical.

Sin embargo, es bien sabido que la eficiencia de las técnicas pasivas de enfriamiento para proporcionar confort térmico depende fuertemente de las condiciones locales.

Del análisis del comportamiento energético efectuado de las cubiertas consideradas, una Cubierta Fría y una cubierta cuya superficie exterior es de baldosas cerámicas, se concluye que, para el caso del clima típico del sur de España, la mayor eficiencia para reducir la carga para enfriamiento en épocas cálidas de la “cubierta fría” estudiada respecto de la habitual de baldosas cerámicas, se ve contrarrestada por el aumento de la carga de calefacción en las épocas frías, si bien el balance global anual es favorable para la Cubierta Fría.

En el caso del clima ecuatorial considerado, el balance anual a favor de la “cubierta fría” es netamente favorable, consiguiéndose una reducción en el consumo energético sustancial respecto de la cubierta de baldosas cerámicas.

Palabras clave Eficiencia energética, enfriamiento pasivo, enfriamiento radiativo, cubiertas frías, dinámica de fluidos.

1 Introducción

En las últimas décadas, numerosas investigaciones en el campo de la eficiencia energética han puesto su foco en la reducción de la demanda energética para conseguir el deseable confort en el interior de los edificios mediante el uso de técnicas que aprovechen los recursos ambientales y climáticos de forma idónea.

En los países cálidos, uno de los mayores problemas lo constituye conseguir condiciones de confort en las épocas del año en que las temperaturas ambientales son altas, constituyendo la búsqueda de este confort la fuente de un fuerte consumo energético, de donde se deriva el interés de implementar técnicas que minimicen la carga de enfriamiento.

Entre las distintas técnicas de enfriamiento pasivo, en el presente trabajo se estudia el caso específico de la llamada “cubierta fría”. Este tipo de cubiertas abarcan una amplia variedad de tipologías que actuando sobre las cubiertas de los edificios intentan reducir los costes energéticos para la climatización de los mismos.

La idea básica de dicho tipo de técnicas consiste en minimizar la ganancia térmica procedente de la irradiación solar y en maximizar la evacuación de calor desde la cubierta por algunos de los procedimientos que dichas técnicas ofrecen.

En general podemos decir que una “cubierta fría” es un sistema de cubierta con un bajo coeficiente de absorción de la radiación solar y un alto nivel de emisividad para la radiación térmica de onda larga. De esta forma se consigue un notable efecto de reducción de la temperatura de la cubierta y por tanto del flujo de calor hacia el interior del edificio.

Este efecto se consigue gracias a las propiedades de los llamados “materiales fríos”, caracterizados por una alta reflectancia solar y una alta emisividad para la radiación de onda larga. En el caso concreto de la cubierta aquí estudiada, el material frío se consigue mediante la aplicación sobre la cubierta de una capa de elastómero blanco, cuyas propiedades radiativas cumplen dichos requisitos.

En el presente trabajo, se analiza la eficiencia energética de esta técnica de enfriamiento radiativo empleada en los dos contextos geográficos y climáticos mencionados: clima mediterráneo, sur de España, ciudad de Sevilla, y clima ecuatorial tropical, zona norte de Colombia, ciudad de Santiago de Cali.

En el caso concreto de este tipo de cubiertas, los altos niveles de irradiación solar y altas temperaturas propias del sur de España pueden aconsejar su uso para disminuir la carga de refrigeración. Sin embargo su uso penaliza la ganancia térmica solar en épocas frías a la vez que aumenta el flujo de calor del edificio hacia el cielo. Ello hace que su utilización deba ser evaluada con la mayor precisión posible a fin de determinar la conveniencia o no de su empleo.

En el caso del clima ecuatorial considerado, la climatología se caracteriza por niveles de irradiación solar bastante homogéneos a lo largo del año, con la presencia frecuente de nubosidad lo que hace que la radiación solar difusa y el flujo de radiación de onda larga desde el cielo sean bastante elevados en comparación con la solar directa. Esto determina el comportamiento de la “cubierta fría” ofrecien-

do resultados en cuanto al balance energético global a lo largo del año mucho más favorables que el obtenido para el clima mediterráneo.

En el presente trabajo, mediante el uso de técnicas de simulación numérica computacional, aplicadas tanto a la dinámica de fluidos, como al flujo de calor en la cubierta y al cálculo de los balances radiativos, se extraen conclusiones sobre los patrones del comportamiento termodinámico de la “cubierta fría” considerada y su rendimiento energético anual en comparación con una cubierta estándar de baldosas cerámicas, en los dos contextos geográficos y climáticos considerados.

2 Los casos de estudio

Para nuestro estudio se ha considerado una vivienda unifamiliar estándar con dos plantas. Ya que la influencia de la Cubierta Fría afecta fundamentalmente a la parte del edificio directamente bajo la misma, su eficiencia para edificios altos está limitada a las plantas superiores. A pesar de ello, la utilidad de este tipo de cubiertas tanto en viviendas, como en edificios de uso más colectivo, escuelas, edificios de oficinas, bibliotecas, etc., queda patente en los casos de estudio que se recogen en el informe “Cool Roof case studies in EU level” del European Cool Roofs Council, Zinzi y Romeo (2010), y en un buen número de recientes publicaciones como las debidas a Synnefa et al. (2012) o a Pisello y Cotana (2014).

Tabla 1 Características termofísicas de las cubiertas

Nº de capa	Descripción	Espesor (m)	Densidad (kg/m^3)	Calor espec. ($J/kg K$)	Conductividad ($W/m K$)
1 (Exterior)	Baldosas cerámicas	0.01	2000	800	1.00
2	Mortero de agarre	0.02	2000	1000	1.40
3	Capa de protección	0.02	1900	1000	1.80
4	Impermeabilización (lámina bituminosa)	0.2	2100	1000	0.7
5	Capa separadora	0.2	1900	1000	1.80
6	Aislamiento (Poliestireno extruido)	0.05	35	1400	0.038
7	Hormigón aligerado	0.15	1200	1000	0.57
8	Bovedilla cerámica	0.30	650	1000	1.58
9 (Interior)	Enlucido	0.015	1000	1000	0.57

Las dos cubiertas estudiadas son de tipo plano y tienen la misma configuración, la cual cumple con las especificaciones del Código Técnico Español. Dicha con-

figuración se describe en Tabla 1 en la que se especifican el dimensionamiento y las características termofísicas de las distintas componentes de la cubierta.

Para la superficie exterior de la capa de baldosas cerámicas se considera un valor de absorptividad de la radiación solar de 0.75, mientras que el coeficiente de emisividad de dicha capa se ha tomado como 0.83 según se referencia en Gozalbo et al. (2008). En cuanto el procedimiento para transformar la cubierta en Cubierta Fría, se ha considerado la aplicación de una capa de elastómero blanco en la superficie de la capa externa de la cubierta. Dicha capa proporciona, según los valores usualmente aceptados, una reflectancia solar de 0.89 y una emisividad en el rango de radiación infrarroja de 0.89.

3 Balance de Energía en la Cubierta

En el presente trabajo los dos tipos de cubiertas estudiadas son de tipo plano y el flujo de calor entre el interior del edificio y el exterior a través de las mismas viene determinado por los siguientes procesos:

- Ganancia de calor en la superficie externa debida a la irradiación solar.
- Intercambio radiativo de onda larga entre la radiación infrarroja procedente del cielo y la emitida por la superficie externa de la cubierta.
- Intercambio de calor por convección entre la superficie externa de la cubierta y el aire ambiente.
- Transferencia de calor por conducción a través de la propia cubierta.
- Intercambio de calor por convección y radiación entre la superficie interna de la cubierta o el interior del edificio.

Otros posibles factores como el intercambio radiativo entre la cubierta y edificios adyacentes o masas vegetales, incluso terreno de altura superior a la del edificio considerado, a pesar de su interés no se han tenido en cuenta.

Para establecer el modelo físico, hay que tener en cuenta que todos los intercambios energéticos se desarrollan simultáneamente. Por ello el modelo físico debe recoger el acoplamiento de las ecuaciones de Navier-Stokes que describen los flujos de aire, con la ecuación de transporte de energía que realizan dichos flujos, las ecuaciones de transferencia de calor a través de las distintas capas de la cubierta y las ecuaciones del intercambio radiativo.

4 Coeficientes de transferencia de calor por convección

Para el intercambio de calor entre las superficies de las cubiertas y el aire ambiente se ha empleado un coeficiente de transferencia de calor por convección

promedio a través del área de la superficie. Para la determinación de este coeficiente se usa la correlación obtenida por Hagishima y Tanimoto (2003) dada por

$$h_c = 8.18 + 2.28 U_R \quad W/m^2K$$

donde U_R es la velocidad del viento en m/s medido a una distancia de $0.6 m$. Según los autores, este valor de h_c está calculado específicamente para la transferencia de calor por convección sobre la cubierta plana de un edificio de dos plantas, por lo que se adapta bien al caso de estudio considerado.

Esta correlación permite un cálculo más preciso de h_c al tener en cuenta la velocidad del viento calculado sobre la cubierta mediante la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, en lugar de emplear para su determinación las velocidades de viento proporcionadas por las estaciones meteorológicas como suele ser habitual en los programas de simulación energética.

Para la superficie de la cubierta que da al interior del edificio, la ecuación de balance energético se define teniendo en cuenta una temperatura interior constante T_{room} considerada de confort según la época del año y un intercambio de calor por convección y radiación para el que se toma un coeficiente de transferencia mixto dado por $h_i = 8 W/m^2K$, que es el habitualmente recomendado en las especificaciones técnicas para este tipo de intercambio de calor en interior.

5 Condiciones ambientales

Como ya se ha señalado, los sistemas pasivos son altamente sensibles a las

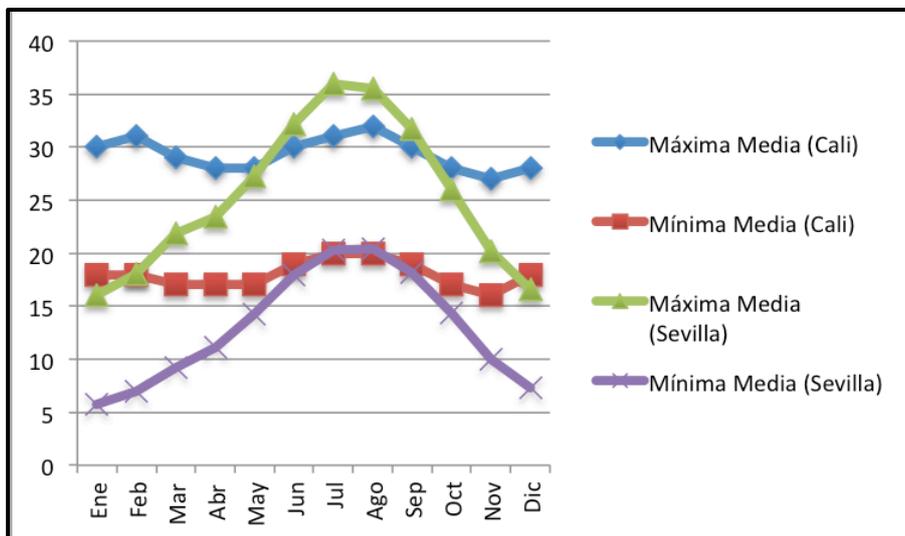


Fig.1 Temperaturas promedios máxima y mínima en Sevilla y Cali

condiciones ambientales locales.

Las características climáticas más relevantes en el Sur de España, y concretamente en el caso de Sevilla, vienen determinadas por una marcada estacionalidad. Así en verano las temperaturas diurnas suelen alcanzar valores elevados, mientras que en invierno los valores son bastante más bajos, pero dentro de una relativa moderación para lo que puede considerarse habitual en Europa.

Por el contrario en zonas ecuatoriales de clima tropical, como puede ser el caso de Cali, las temperaturas son bastante uniformes a lo largo del año, y con unos intervalos de variación diarias relativamente pequeños, con medias próximas a la temperatura de confort interior considerada en el presente trabajo en 25°.

Los distintos comportamientos de las temperaturas pueden observarse en la Figura 1 que ilustra de forma clara lo anterior.

Los vientos en ambos casos no suelen ser fuertes pero pueden variar desde la calma total hasta vientos relativamente moderados que pueden incrementar de forma notable la transferencia de calor por convección entre la cubierta y el ambiente. Los valores estudiados en el presente trabajo son de velocidades de entrada para el viento en el dominio de cálculo de 1, 4 y 8 m/s, que se consideran suficientemente representativas de los valores promedios que se dan en los dos marcos climatológicos considerados.

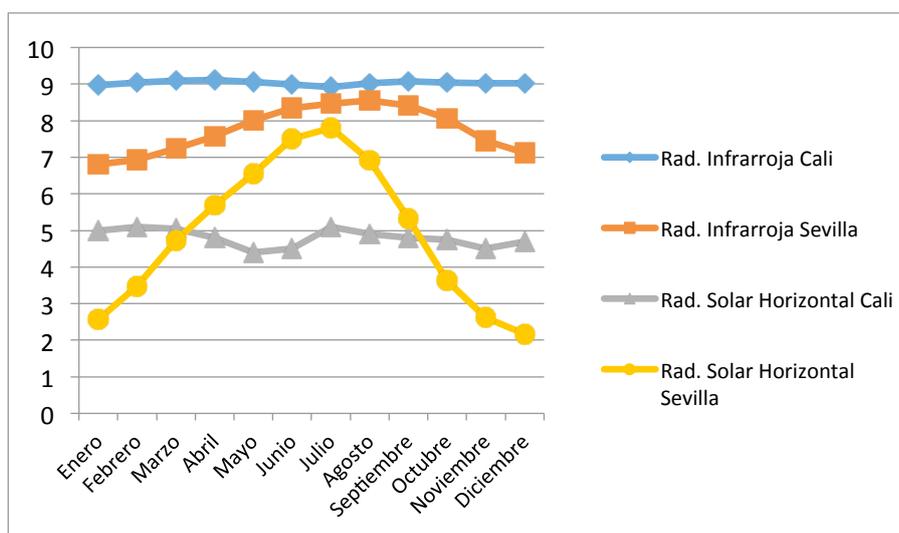


Fig.2 Promedio mensual de radiación solar y radiación infrarroja incidentes sobre superficie horizontal (kWh/m2/día)

En cuanto a la radiación solar, como se observa en la Figura 2, en el caso de Sevilla la radiación solar incidente sobre la superficie horizontal tiene asimismo

un carácter marcadamente estacional con valores relativamente altos en los meses de verano y más moderados en invierno. Asimismo la radiación de onda larga alcanza valores más altos en verano, pero con una variación menor a lo largo del año.

En cambio, en el caso de Cali, la radiación solar es relativamente homogénea a lo largo de todo el año y viene afectada por la presencia habitual de nubosidad, lo que hace que pese a su latitud, se alcancen valores en verano inferiores a las del sur de España. Asimismo la radiación infrarroja se mantiene relativamente constante en Cali a lo largo de todo el año y con valores superiores a los de Sevilla.

6 Estimación de la radiación de onda larga del cielo

Una diferencia esencial entre los dos tipos de radiaciones que afectan a la cubierta es que mientras la radiación solar de onda corta actúa en los periodos de luz solar, el intercambio de radiación de onda larga entre la cubierta y el cielo sucede en el ciclo completo del día, incluso por la noche, cuando dicho intercambio suele ser negativo, es decir, la cubierta emite al exterior más radiación térmica de onda larga de la que recibe. De ahí la necesidad de un cálculo lo más preciso posible de este tipo de radiación.

La presencia de nubes afecta de forma significativa a este tipo de radiación, aumentando su valor a mayor densidad de nubes y menor altura de las mismas. Una correlación bastante usada para este tipo de situaciones es la presentada por Goforth et al. (2002). Dicho modelo es una variante del modelo de Swinbank y viene dado por la siguiente expresión:

$$Q_{sky} = (1 + KC^2) 8.78 \cdot 10^{-13} T_{amb}^{5.852} RH^{0.07195}$$

Donde K es un parámetro que depende la altura de la capa de nubes, C es el porcentaje de nubosidad, 0 para cielos totalmente claros y 1 para cielos totalmente nubosos y RH es la humedad relativa.

En el presente trabajo se ha usado el modelo de Goforth. Para ello se han utilizado los valores proporcionados por distintos servicios meteorológicos: Agencia Española de Meteorología, y los servicios meteorológicos de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Los valores medios mensuales considerados para las radiaciones de onda corta y onda larga se presentan en la Figura 2, para las dos localizaciones geográficas consideradas.

7 Simulación Numérica

7.1 Dominio de cálculo

Para efectuar la simulación computacional se ha considerado un dominio bidimensional que abarca una amplia región en torno al edificio estudiado. De esta forma se puede simular de forma adecuada los flujos de aire cuando inciden sobre la vivienda considerada, y en particular su comportamiento sobre la cubierta.

Para la resolución numérica del flujo de aire se ha efectuado un mallado mediante elementos triangulares del dominio considerado, para efectuar posteriormente una discretización del problema por el Método de los Elementos Finitos (MEF). La malla considerada consta de un total de 25000 triángulos, lo que garantiza una buena precisión en los resultados numéricos que se obtienen.

Asimismo se ha efectuado un mallado bidimensional de la cubierta para la simulación numérica de la conducción de calor a través de las distintas capas que la conforman usando asimismo un tratamiento por MEF de las ecuaciones de conducción del calor a través de la cubierta.

7.2 Resolución numérica

La resolución numérica del problema se ha llevado a cabo mediante una discretización por MEF de las ecuaciones termodinámicas de Navier-Stokes.

En dicha resolución se ha empleado el logicial de código libre FreeFem del Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA) francés. Las ecuaciones de transferencia de calor a través del muro interno y la capa externa se han resuelto mediante una discretización por diferencias finitas de las mismas.

El problema se ha resuelto en un periodo temporal de una semana para cada mes del año, usando los valores típicos meteorológicos representativos de cada mes. Para ello se han resuelto las ecuaciones evolutivas en tiempo de Navier-Stokes para el fluido, tanto para su dinámica como para el transporte de calor, y las ecuaciones evolutivas de la conducción de calor a través de las distintas capas de la cubierta.

Para la resolución de las ecuaciones de la dinámica del fluido se ha usado un modelado de la turbulencia tipo $k - \epsilon$. Ello es necesario debido a las características del problema en el que el flujo de aire sobre la cubierta del edificio presenta valores de Reynolds que hacen necesario tener en cuenta el efecto turbulento.

En cada paso de tiempo se toman como condiciones de frontera sobre la superficie exterior de la cubierta la irradiación solar y el intercambio radiativo de onda

larga ya descrito, y sobre la superficie interior el balance energético por radiación y convección con el interior del edificio.

8 Resultados

Para la determinación de los flujos de calor se han considerado temperaturas constantes en el interior del edificio a lo largo de cada periodo de cálculo.

Dicha temperatura, considerada de confort, ha sido de 25°C para todo el año para el caso de la ubicación en el marco ecuatorial. Para el caso del Sur de España, se ha tomado como temperatura de referencia 21°C para los meses de invierno, 23°C para primavera y otoño y 25°C para verano.

8.1. *Flujos de calor mensual*

En las Figuras 4 y 5 se presentan los flujos mensuales de calor en kWh/m², en ambas localidades, para cada uno de las cubiertas consideradas y para distintas velocidades de viento. Los valores positivos representan flujo de calor hacia el interior del edificio y los negativos hacia el exterior.

Se observa cómo para Sevilla, el flujo de calor oscila entre valores próximos a -1.5 kWh/m² en los meses de invierno hasta valores próximos a 1.5 kWh/m² en verano. Este resultado es totalmente esperable debido a la climatología típica de Sevilla, con valores frescos en invierno y relativamente calurosos en verano, con primaveras y otoños suaves, que presentan temperaturas medias ambientales próximas a las de confort.

Es destacable el hecho de que las curvas de flujo de calor para la Cubierta Fría están en todos los casos por debajo de las mismas para la cubierta clásica, para cada velocidad de viento considerada.

Para Cali se observa que dicho flujo de calor es casi mayoritariamente positivo. Es decir hay ganancia de calor hacia el interior del edificio, fruto tanto de las temperaturas moderadas con medias ligeramente por encima de la temperatura de confort, como de las ganancias térmicas que implican la radiación solar y la radiación infrarroja desde la bóveda celeste. Esta radiación infrarroja es responsable en buena medida de la ganancia térmica señalada, pues como se indicó anteriormente, para Cali, sus valores están por encima de la irradiación solar sobre superficie horizontal.

También en el caso de la ciudad de Cali se observa que las curvas de flujo de calor para la Cubierta Fría están por debajo de las correspondientes a la cubierta clásica, para cada velocidad de viento considerada.

En Figura 5 se presentan los flujos de calor mensual en kWh/m² para Cali. Se observa cómo para cada velocidad del viento, el flujo de calor es netamente mayor para la cubierta rematada con baldosas de cerámica.

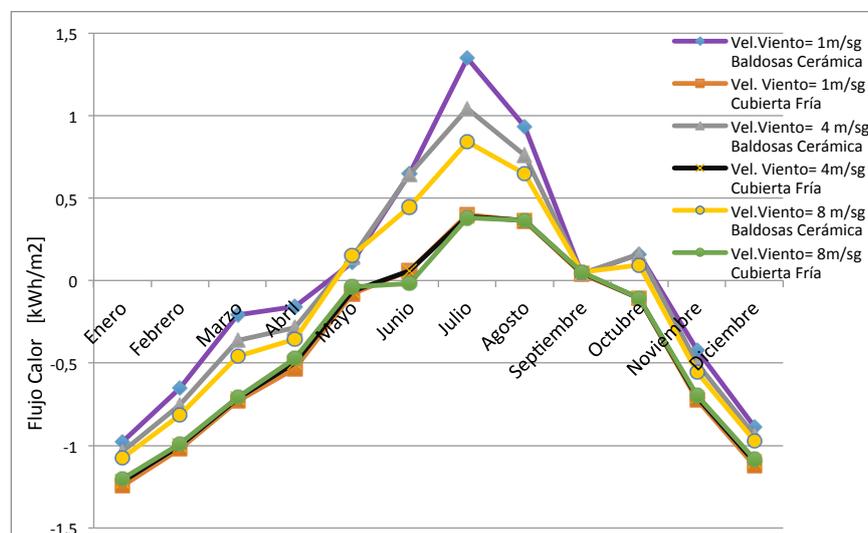


Fig.4 Flujos de calor mensual (kWh/m²) en Sevilla

Se observa asimismo cómo el flujo de calor disminuye a medida que aumenta la velocidad del viento hasta la máxima velocidad considerada de 8 m/sg. Ello es debido a que al aumentar la velocidad de viento, empieza a predominar la convección entre la cubierta y el aire, sobre la ganancia térmica proveniente de la irradiación solar y el intercambio radiativo de onda larga entre la cubierta y la bóveda celeste.

Sin embargo, este hecho no se observa con igual fuerza para la Cubierta Fría en el caso de Sevilla, donde los flujos de calor son muy homogéneos para las distintas velocidades del viento.

8.2.- Balance anual de los flujos de calor

En las Figuras 6 y 7 se presentan los balances de los flujos de calor anuales para los distintos tipos de cubierta, velocidades de viento y para las dos localizaciones estudiadas. Se observa que en líneas generales en ambas localizaciones, los resultados obtenidos señalan un menor flujo de calor a través de la cubierta fría que a través de la cubierta clásica de baldosas cerámicas. Esta disminución del flujo de calor es más acentuado en la localización de Santiago de Cali, donde se observa una fuerte diferencia de dicho flujo, sobre todo para velocidades moderadas del viento.

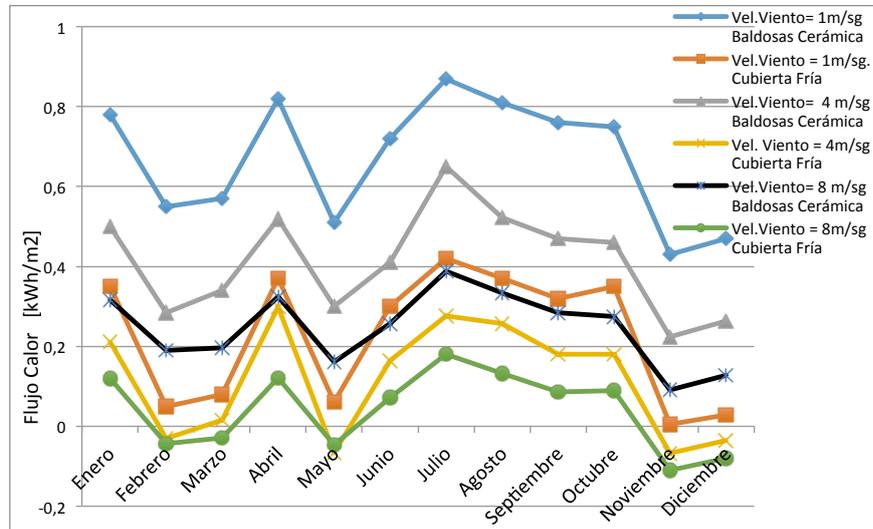


Fig.5 Flujos de calor mensual (kWh/m2) en Santiago de Cali.

9 Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que para las dos localidades estudiadas, el balance anual del flujo de calor para el año completo es menor cuando se usa la considerada Cubierta Fría que cuando es usada una cubierta típica de baldosas cerámicas. Este resultado es más evidente en la localidad de Santiago de Cali, que en

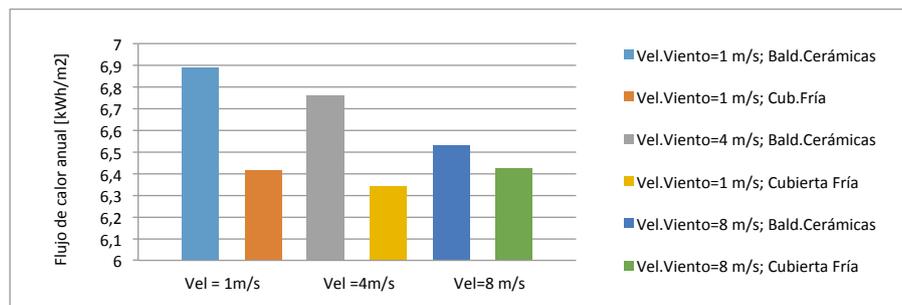


Fig.6 Balance anual de los flujos de calor (kWh/m2) para Sevilla.

Sevilla, debiéndose esta diferencia a las distintas condiciones climáticas de ambas localidades.

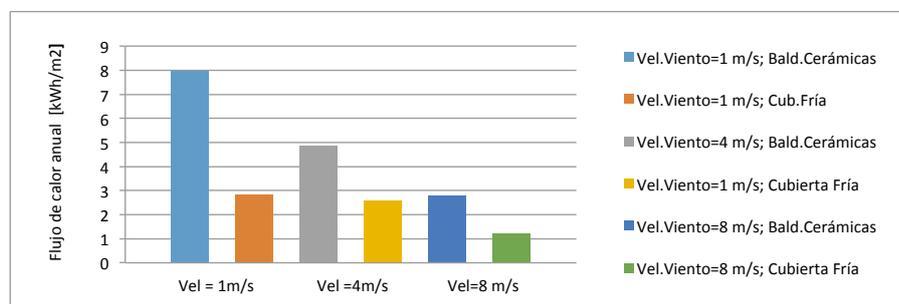


Fig.7 Balance anual de los flujos de calor (kWh/m²) para Cali

Por tanto, como conclusión final se puede establecer que el tipo de cubierta estudiada proporciona un mayor ahorro energético en el contexto geográfico y climático estudiado.

Sin embargo, su uso en zonas de climatología más fría debe ser evaluado con precaución debido a la penalización en cuanto a ganancia térmica de origen radiativo, que este tipo de cubiertas produce en los meses fríos.

10 Citas y Referencias

- Goforth M A, Gilcrest G W, Sirianni J D (2002) Cloud Effects on Thermal Downwelling Sky Radiance. SPIE Vol. 4710.
- Gozalbo A, Orts M J et al. (2008) Study of the radiant properties of ceramic tiles. Instituto de Tecnología Cerámica (ITC). Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE). Universitat Jaume I. (Castellón, España) & KERABEN GRUPO, S.A.
- Hagishima, Tanimoto J (2003) Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces. J. Building and Environment 38(7): 873–881
- Pisello A, Cotana F (2014). The thermal effect of an innovative cool roof on residential buildings in Italy: Results from two years of continuous monitoring. Energy and Buildings 69: 154-164.
- 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.
- Zinzi M, Romeo C. Cool Roofs case studies in EU level (2010). Intelligent Energy Europe program SAVE 2007