



## **ENFRIAMIENTO PASIVO: CÁLCULO Y EXPERIMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO RADIANTE.**

**M. Victoria Mercado (1); Alfredo Esteves (2); Celina Filippín (3)**

(1) Doctora Arq., becaria posdoctoral CONICET, [mvmercado@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:mvmercado@mendoza-conicet.gob.ar)

(2) Ing. Industrial, Investigador Independiente CONCIET, [aesteves@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:aesteves@mendoza-conicet.gob.ar)

(3) Doctora Arq., investigador Independiente CONICET, [cfilippin@cpenet.com.a](mailto:cfilippin@cpenet.com.a)

Centro de Ciencia y Técnica- Mza- CONICET. Cx Postal 5500, Parque general San Martín s/n. Mendoza, Argentina.

Tel.:(54) 261544310

### **RESUMEN**

La tecnología existente ha permitido que edificios modernos puedan ofrecer confort térmico independientemente de su diseño en relación con el medio donde se emplaza. Sin embargo esta situación se asienta en un elevado consumo de energía proveniente de fuentes no renovables. Las técnicas de climatización natural, y específicamente los sistemas de enfriamiento pasivo tienen un alto potencial para reducir estos problemas. El presente trabajo forma parte del estudio y desarrollo del sistema de calefacción radiante solar pasivo –SIRASOL- para ser utilizado también como un sistema de enfriamiento radiante pasivo en verano. En un trabajo anterior se realizó un análisis del potencial de enfriamiento de la ciudad de Mendoza para la utilización de enfriamiento radiante como medio de refrescamiento pasivo, aportando al estado del arte datos de emisividad y temperatura de cielo para la ciudad de Mendoza a partir de métodos validados. El objetivo de este trabajo es el análisis matemático y experimental de un prototipo de enfriamiento radiante pasivo a partir del intercambio relevado en las temperaturas de aire de entrada y salida. Como resultado principal se obtiene que el prototipo responde enfriando entre 5°-3°C el aire.

Palabras claves: enfriamiento pasivo, intercambio radiante nocturno, sistemas pasivos de enfriamiento.

### **ABSTRACT**

The existing technology has allowed modern buildings can provide thermal comfort regardless of design in relation to the environment in which it is located. However, this situation is based on a high consumption of energy from renewable sources. Natural cooling techniques, and specifically passive cooling systems have a high potential to reduce these problems. This work is part of research and development of solar radiant heating, passive-SIRASOL to be used also as a passive radiant cooling system in summer. In a previous work analyzed the cooling potential of the city of Mendoza to the use of radiant cooling as a means of passive cooling, providing state of the art data sky emissivity and temperature for the city of Mendoza from methods validated. The objective of this work is the mathematical and experimental analysis of a prototype passive radiant cooling from the exchange relieved in air temperatures in and out. As main result is obtained that the prototype meets cooling between 5 ° -3 ° C air.

Keywords: passive cooling, nocturnal radiant Exchange, passive cooling systems.

### **1. INTRODUCCIÓN**

El estado actual y disponible de la tecnología ha permitido que edificios modernos puedan ofrecer confort térmico independientemente de su diseño en relación con el medio donde se emplaza. Sin embargo esta situación se asienta en un elevado consumo de energía proveniente de fuentes no renovables. Para la

situación estival, dentro de este contexto, en el país la venta de equipos de aire acondicionado creció 100 % respecto del verano 2005 (INDEC, 2010). Tendencia que acompaña el aumento en la facturación energética eléctrica residencial.

Las técnicas de enfriamiento natural y pasivo tienen un alto potencial para reducir estos problemas. Es posible prevenir los problemas de sobrecalentamiento, reducir la carga de refrigeración y mejorar las condiciones de confort térmico. Santamouris y Asimakopoulos (2001), acuerdan que se puede lograr un ahorro energético total del 20% en edificios nuevos y/o existentes con el uso de estrategias de enfriamiento pasivo: ventilación, enfriamiento evaporativo, enfriamiento por suelo y enfriamiento radiante.

Todas las técnicas de enfriamiento implican utilizar sumideros de energía. Para el enfriamiento radiante se utiliza la atmósfera y sus características regionales. La temperatura del subsuelo hacia la media anual de 15.6°C y el cielo nocturno con temperaturas por debajo de los -10°C en los meses de verano (libre de nubes), permite la utilización de enfriamiento radiante en la ciudad de Mendoza.

En cuanto al requerimiento climático presenta la necesidad de cielos claros, con poca nubosidad durante las noches y bajo porcentaje de humedad relativa. Climas secos en regiones áridas, características naturales de la ciudad de Mendoza en la estación estival. En un trabajo anterior se analizó, estudio y calculó el potencial de la ciudad de Mendoza para la utilización del enfriamiento nocturno. Posteriormente se presentaron algunos resultados como base del presente estudio.

Previamente se ha desarrollado un sistema de calefacción radiante solar pasivo SIRASOL de captación indirecta sin acumulación de calor, donde la disipación de calor se realiza principalmente por medio de radiación (Mercado et al, 2005,2006, 2007, 2009, 2010, 2011). El presente trabajo forma parte del estudio y desarrollo del SIRASOL para ser utilizado también como un sistema de enfriamiento radiante pasivo en verano. Se pretende caracterizar al sistema como un sistema tipo indirecto, por tratarse de un elemento que se enfría por radiación y está en contacto inmediato con el espacio a acondicionar. El panel estará en contacto con el aire interior, enfriándolo por debajo de su temperatura inicial.

El presente trabajo continúa con la investigación del posible uso del SIRASOL como sistema de enfriamiento radiante. Para ello, como primera etapa de trabajo experimental, se construyó un prototipo de panel radiante frío y se monitoreo su comportamiento, analizando también el intercambio convectivo que interactúa con el proceso radiante (Givoni 1994).

## **2. OBJETIVOS**

El objetivo de este trabajo es el análisis matemático del potencial de enfriamiento radiante nocturno de la ciudad de Mendoza para un prototipo experimental de un sistema de enfriamiento radiante pasivo.

## **3. MÉTODO**

El trabajo se inicia con el análisis de los principales requerimientos climáticos para la utilización del enfriamiento radiante como estrategia de enfriamiento pasivo.

La metodología consta de cuatro etapas correspondientes a los pasos que establece B. Givoni para el análisis de sistemas de enfriamiento radiante: a- la radiación emitida por el cielo, b- la radiación de onda larga emitida por el radiador hacia el cielo, c- el intercambio convectivo entre el radiador y el aire circundante y d- la transferencia de calor desde el sistema radiante al espacio, durante las horas de la noche.

## **4. ENFRIAMIENTO RADIANTE**

El caso de la utilización de enfriamiento radiante pasivo como climatización de espacios, está basado en la

pérdida de calor por radiación de onda larga hacia el cielo, debido a que la temperatura de este será más baja que la temperatura de la mayoría de las construcciones sobre la tierra. Esta situación se ve beneficiada, además, por lo que se denomina ventana atmosférica. Esta constituye una parte sustancial de este recurso de enfriamiento climático.

Otro factor a considerar es que la radiación que puede absorber un cielo nocturno diáfano varía marcadamente según direcciones desde un máximo posible de 100% en el zenith hasta prácticamente 0% en el horizonte. Por lo tanto la posición de una placa radiante para enfriamiento es horizontal y no depende como en el caso de un colector solo, de la latitud del sitio. Por lo tanto la utilización de la superficie del techo de los edificios, siendo el elemento de la envolvente que mayor exposición al cielo, representa la superficie radiativa más apropiada y la localización natural para un radiador nocturno (Givoni, 1994). Por lo tanto el esquema de funcionamiento se conformará por un panel radiante, el local a enfriar y el mecanismo que realice la transferencia térmica entre el panel y el local.

Esto se transforma en una variable de importancia si se quiere trabajar con el SIRASOL como sistema de enfriamiento, debido a que composición geométrica responde a la búsqueda de una mayor ganancia solar en invierno, el plano de captación posee un ángulo  $\beta = 45^\circ$ , lo que disminuirá drásticamente el potencial de enfriamiento en el verano.

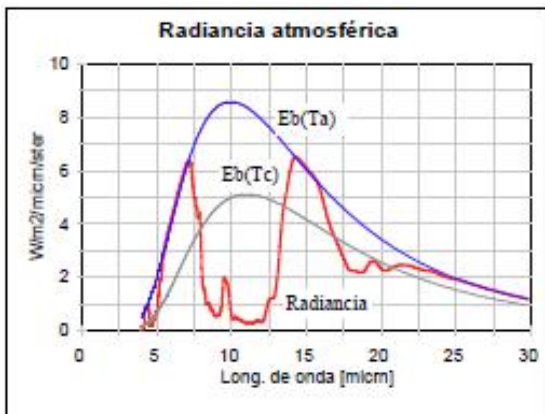


Fig. 1-a: Espectro electromagnético y ventana atmosférica

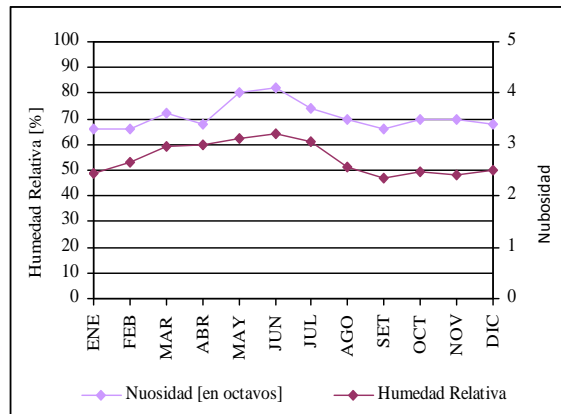


Fig. 1-b: Nubosidad y Humedad Relativa para datos mensuales del SMN para la ciudad de Mendoza.

En las figuras precedentes se puede observar que el requerimiento climático de cielos claros, con poca nubosidad durante las noches y bajo porcentaje de humedad relativa son características naturales de la ciudad de Mendoza en la estación estival. En la figura 1-b, se presenta la cantidad de días nublados en octavos y el porcentaje de humedad relativa mensual en base a datos del Servicio Meteorológico Nacional. De este modo es posible advertir el potencial climático para este tipo de estrategia de enfriamiento en la ciudad dado que los días de nubosidad son bajos igual que los niveles de humedad relativa.

Para el análisis de todo sistema de enfriamiento radiante Givoni establece cuatro pasos:

- 1- La radiación emitida por el cielo
- 2- La radiación de onda larga emitida por el radiador hacia el cielo,
- 3- El intercambio convectivo entre el radiador y el aire circundante y,
- 4- Transferencia de calor desde el sistema radiante al espacio, durante las horas de la noche.

El presente trabajo se estructura a partir de estos cuatro pasos para el análisis del potencial de enfriamiento de la ciudad de Mendoza y del sistema que se experimenta.

## 5. ANÁLISIS DE SISTEMA DE ENFRIAMIENTO RADIANTE

Como se mencionó, en un trabajo anterior, se procedió a calcular la emisividad de cielo ( $\epsilon_c$ ) y la temperatura de cielo ( $T_c$ ) de la localidad en cuestión a partir del método de Berdhal and Fromberg, 1982 en función de datos medidos de temperatura de rocío ( $Tr$ ) en el período estival 2008-2009 (Noviembre y Diciembre de 2008; Enero y Febrero de 2009), para el período nocturno (0:00 – 8:00), de acuerdo a las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

$$V_{\text{cielo noche}} = 0.741 + 0.0062 * Tr \quad (1)$$

$$T_{\text{cielo}} = V_{\text{cielo noche}}^{1/4} * Text \quad (2)$$

Donde:

0.741 y 0.00062 son constantes de las correlaciones;

$Tr$  es la temperatura de punto de rocío en  $^{\circ}K$ ;

$\epsilon_c$ , emisividad de cielo;

$Text$ , es la temperatura ambiente del período nocturno (20:00-8:00) en  $^{\circ}K$ .

En la figura 2 se presentan los resultados de emisividad y temperatura de cielo en gráficos de dispersión. Es posible advertir que para el período de verano la emisividad de cielo ronda entre valores de 0.72 – 0.80, lo que evidencia un excelente potencial para el uso de sistemas de enfriamiento radiante pasivos en la ciudad.

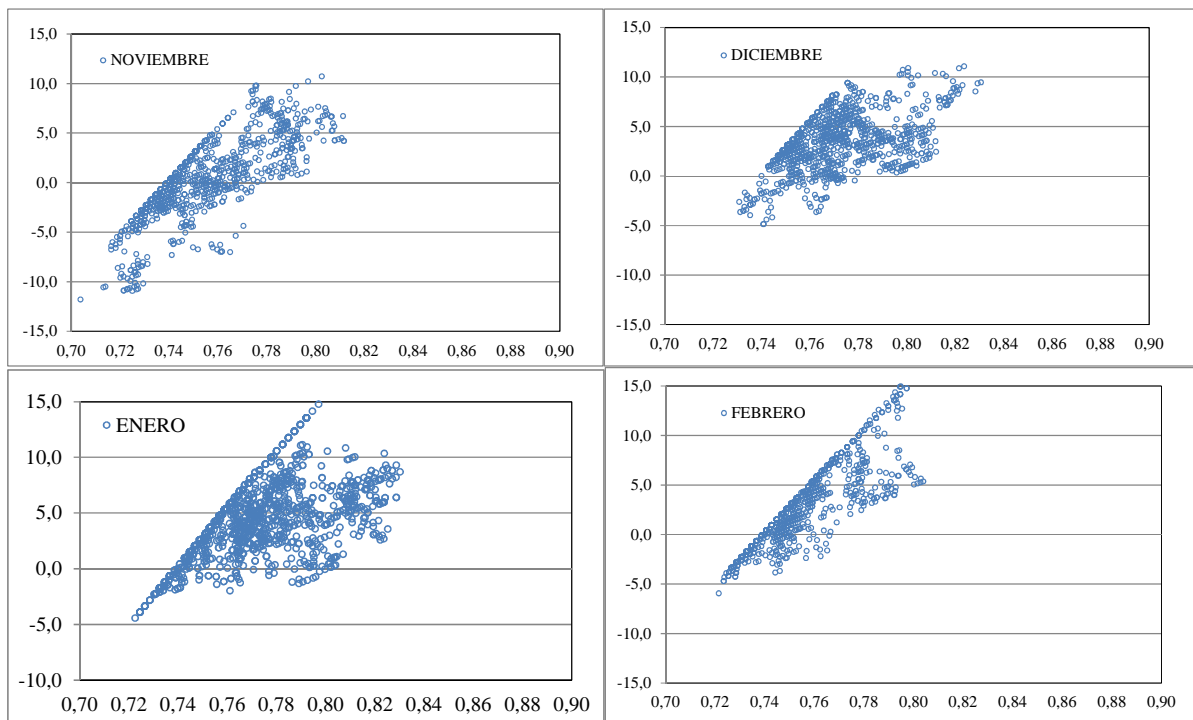


Fig. 2: Relación de Temperatura de cielo y emisividad de cielo para el período nocturno desde las 0:00 a las 8:00hs.

### 5.1. Cálculo de radiación emitida por el cielo

A partir de los resultados obtenidos de emisividad y temperatura de cielo se prosigue a calcular la radiación de cielo o radiación emitida por el cielo de onda larga que llega a la tierra en función de la temperatura del aire cerca del suelo y una emisividad variable de cielo, mediante la ecuación 3.

$$R = \epsilon_c * T_{\text{cielo}}^4 = V_{\text{cielo noche}} * \epsilon_c * Text^4 \quad (3)$$

Donde:

R, radiación atmosférica;

$\sigma$  es la constante de Stefan Boltzman ( $5.7E^{-0.8}$ );

$\epsilon$ , emisividad de cielo;

$T_a$ , es la temperatura del aire cerca del suelo media del período nocturno (0:00-8:00) en °K.

En la figura 3 se muestran los resultados para radiación de cielo para los meses monitoreados. Se puede observar que el potencial presenta una franja estable para los cuatro meses situada entre los valores de 310W y 350W.

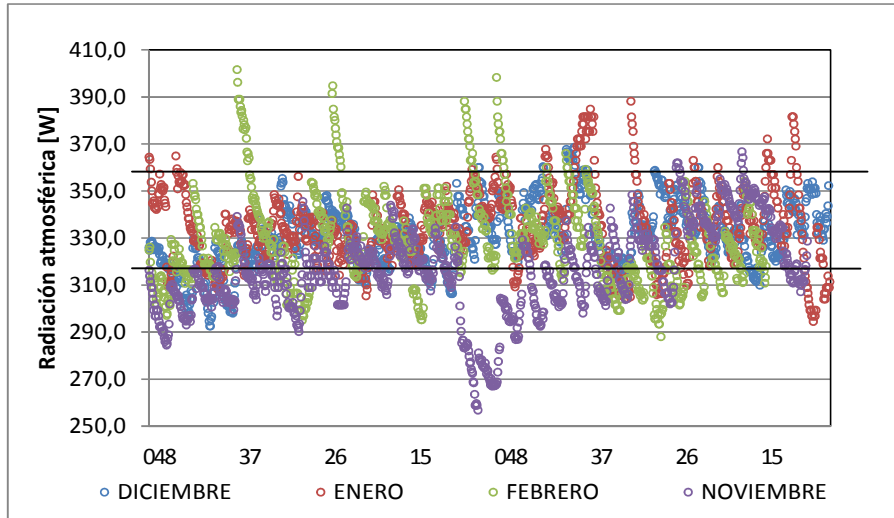


Fig. 3: Relación de Temperatura de cielo y emisividad de cielo para el período nocturno desde las 0:00 a las 8:00hs.

En la Tabla 1 se exponen valores de radiación de cielo promedio para cada mes del año calculados a partir de datos estadísticos del Servicio Meteorológico Nacional. Si se realiza una comparación entre los resultados a partir de datos monitoreados (Figura 3) y los datos obtenidos a partir de datos estadísticos se observa una diferencia a favor de los primeros. Esta situación se debe a que los datos estadísticos utilizados son las temperaturas medias de los períodos diurnos completo, esta situación hace que la temperatura de aire cerca del suelo sea mayor promoviendo un descenso en la radiación de cielo calculada.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
$R = \epsilon \sigma T_c^4$ [W/m <sup>2</sup> ]	321,2	316,7	305,4	280,1	260,0	241,1	237,8	241,3	253,6	275,0	296,9	314,6

Tabla 1: Radiación de cielo para datos mensuales estadísticos.

## 5.2. Cálculo de radiación de onda larga emitida por el radiador hacia el cielo

Para evaluar la radiación de onda larga emitida por un radiador hacia el cielo, se trabaja con las propiedades de un prototipo construido en las instalaciones del laboratorio de ambiente humano y vivienda (LAHV). En la Figura 4 se pueden observar fotografías del mismo.

El sistema consta de una placa radiante pintada de color negro mate con el propósito de lograr una emisividad cercana a 0.88 (Yañez 1982) de 2m<sup>2</sup> siendo sus dimensiones de 2m de largo por 1m de ancho. El canal por donde pasara el medio de transferencia (aire) es de 5cm, por el lado posterior se coloca una placa de aislante térmico (poliestireno expandido de 0.05m) con el fin de disminuir y anular la transferencia radiante inmediata al entorno. El prototipo se ubicó con sus aberturas orientadas en el eje S-N en consecuencia a la predominancia en la frecuencia de dirección de vientos para el período de medición (Figura 5). A raíz de esto se evalúa la transferencia de la placa por medio del intercambio convectivo, realizando el monitoreo de la temperatura de aire de entrada y salida.



Fig. 4: Imágenes del prototipo de experimentación de un sistema de enfriamiento radiante pasivo.

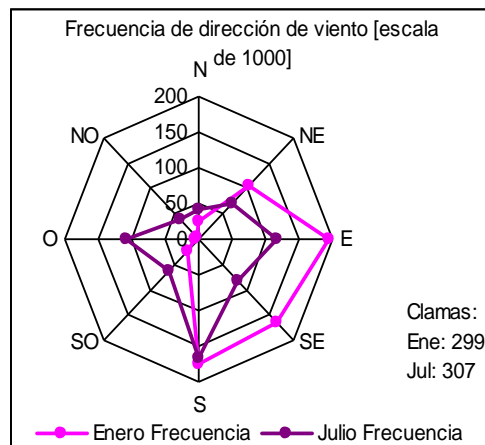


Fig. 5: Rosa de los vientos con frecuencia en dirección de vientos.

El monitoreo del prototipo se realizó para el período estival 2013 (22 de Enero al 28 de Febrero), por razones climáticas se trató de un verano atípico dado la cantidad de días de cielo cubierto. En la tabla 2 se muestran en verde los días de cielo sin nubes viables para el cálculo de la radiación emitida por el radiador denominado en el presente trabajo como panel radiante.

ENERO											FEBRERO				
22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		1	2	3	4	5

Tabla 2: Período seleccionado de monitoreo en prototipo experimental y días de cielo sin nubes.

En la Figura 6 se presentan los datos de temperatura de panel radiante medidos, correspondiente a los días de cielo despejado indicados en la tabla 2. Dado que la emisividad de la placa es conocida se exponen también los resultados de radiación emitida por el panel radiante, calculados a partir de la ecuación 4.

$$R_p = \epsilon_{sup} * \sigma * T_p^4 \tag{4}$$

Donde:

- $R_p$ , radiación emitida por la superficie;
- $\sigma$  es la constante de Stefan Boltzman ( $5.7E^{-0.8}$ );
- $\epsilon_{sup}$ , emisividad de la superficie del panel radiante;

$T_p$ , es la temperatura superficial del panel radiante en °K.

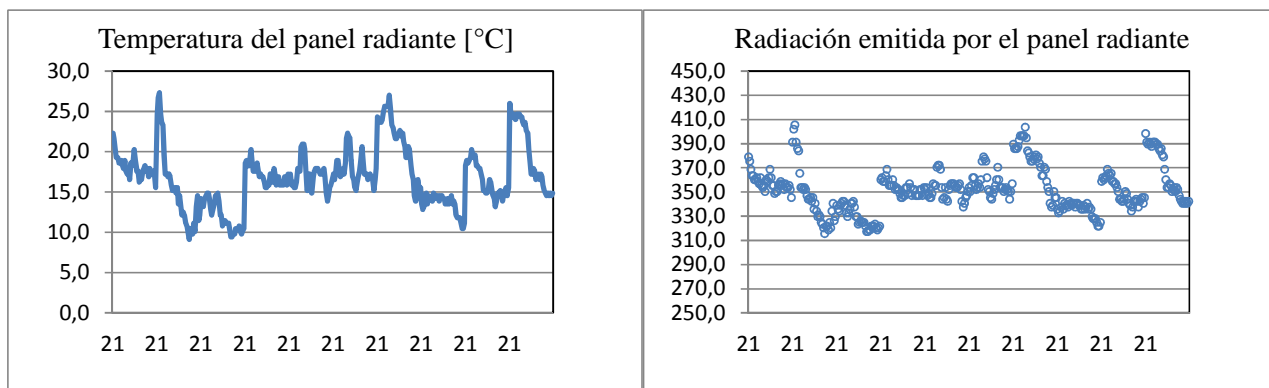


Fig. 6: Temperatura de panel y radiación emitida hacia el cielo.

### 5.3. Intercambio convectivo entre el radiador y el aire circundante

Baruch Givoni afirma que toda superficie que irradia calor hacia el cielo tiene también una componente de intercambio convectivo con el aire circundante, (Givoni, 1994). Considerando al prototipo construido como un sistema de radiador expuesto, el intercambio convectivo es una función del coeficiente convectivo que depende de la velocidad del viento. Para el cálculo de este coeficiente se utilizan datos medidos de velocidad de viento por medio de la ecuación 5 (Duffie & Beckmann, .....)

$$h = 5.7 + 3.8 v$$

(5)

Donde:

$h$ , coeficiente convectivo [ $W/m^2C$ ];

$v$  es la velocidad del viento en m/s

Entonces la cantidad de calor que el sistema intercambia por convección se obtiene a partir de la ecuación 6. (Givoni 1994).

$$Q_c = h (T_p - T_a)$$

(6)

Donde:

$Q_c$ , es el calor intercambiado por convección

$h$ , coeficiente convectivo [ $W/m^2C$ ];

$T_p$ , es la temperatura del panel;

$T_a$ , es la temperatura del aire en contacto con el panel radiante.

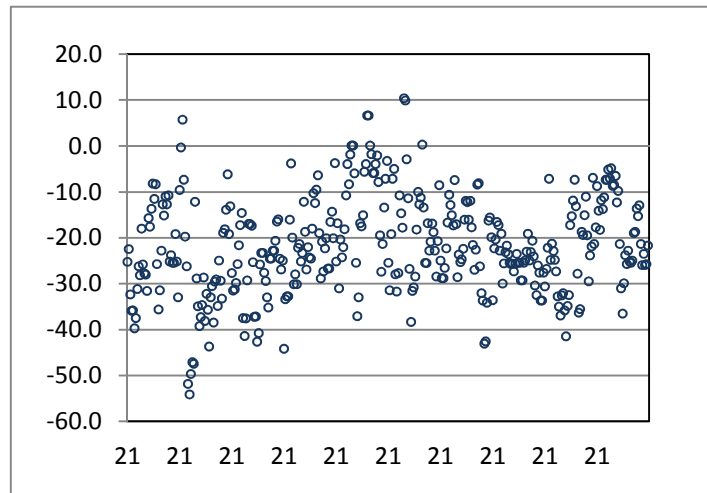


Fig. 7: Intercambio convectivo entre el radiador y el aire circundante.

#### 5.4. Transferencia de calor desde el sistema radiante al espacio.

En los sistemas de acondicionamiento pasivo se debe posibilitar la transferencia de calor entre el mismo y el espacio a climatizar. Para los sistemas de enfriamiento radiante este intercambio se puede realizar de varias maneras lo que va a caracterizar al sistema, el prototipo que se ha experimentado utiliza la convección natural como vehículo de transporte de la energía entre el radiador y el espacio. A razón de esta situación se tomaron registros de la temperatura del aire en las dos aberturas del sistema denominadas L1 y L2. En la figura 7 se presentan los datos para las noches de los días monitoreados.

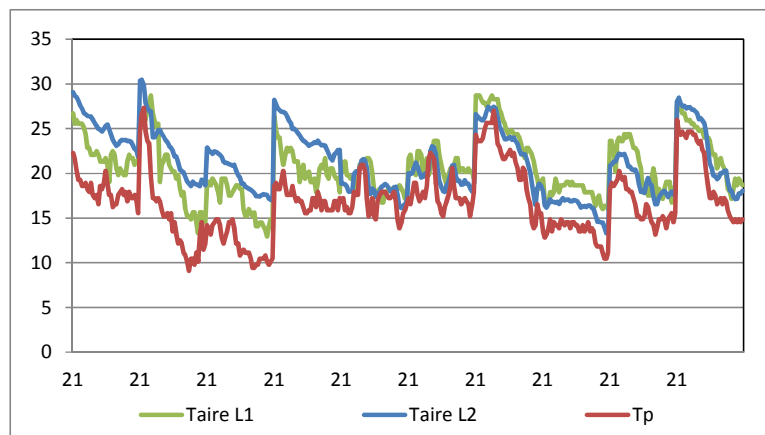


Fig. 6: Intercambio convectivo entre el radiador y el aire circundante .

La figura 7 muestra la temperatura medida del panel y las temperaturas de aire L1 y L2, se observa que la temperatura del panel presenta una diferencia de hasta 10°C con la temperatura del aire más alta, considerada la temperatura del aire de entrada. Para los primeros días la temperatura más alta es Taire L1, por el contrario para los últimos días presentados en la Figura 7 la temperatura más alta es Taire L2. Esto se considera como un fenómeno producido por el cambio de dirección del viento. Como es posible advertir en la Figura 5, la dirección de viento predominante en el período de medición es S y SE, sin embargo existen también brisas con dirección contraria.



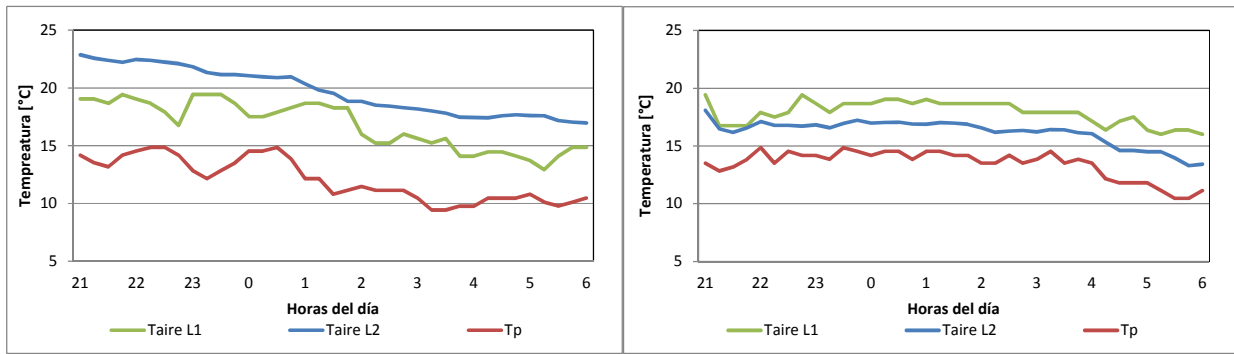


Fig. 8: Intercambio convectivo entre el radiador y el aire circundante para dos días de medición.

En la figura 8 se presentan dos días, el primer día donde Taire L1 se muestra como la temperatura mayor, evidenciando que Taire L2 es hasta 4.5°C más baja. Esto se considera a razón de que el aire entrante en el sistema ha intercambiado calor con el panel y ha descendido su temperatura. En el caso del segundo día presentado la situación presenta una diferencia menor alcanzando hasta 3°C, siendo la temperatura mayor Taire L2.

#### 5.4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha realizado un análisis del potencial de la ciudad de Mendoza para la utilización de enfriamiento radiante como medio de refrescamiento pasivo, contribuyendo y aportando al estado del arte datos de emisividad y temperatura de cielo para la ciudad de Mendoza a partir de métodos validados.

Se ha ensayado el análisis de un sistema de enfriamiento radiante según una metodología propuesta por B. Givoni que proporciona un estudio exhaustivo del mismo y proporciona datos validados y de gran valor para el mismo.

Los resultados obtenidos tanto del análisis matemático como del análisis experimental demuestran que la estrategia de enfriamiento radiante pasivo es válida y posee un gran potencial en la ciudad de Mendoza. Además de las mediciones se obtiene que el descenso de temperatura que ocasiona el panel radiante al aire alcanza una diferencia de hasta 5°C entre la temperatura de entrada y salida del fluido en cuestión en un panel con 2m<sup>2</sup> de recorrido.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Duffie J.A. Y Beckman W.A. (1991). Solar Engineering of Thermal Process. 2a Edición. Wiley. New York. Methodology for Solar Radiation in Tilt Surfaces: LIU Y JORDAN.
- Erico Frigerio. (2004) AVERMA, Vol. 8; pp. 11.25 – 11.28.
- Givoni. (1992). "Confort, Climat analysis and Building Design Guidelines". Energy and Buildings 18, pp 11-23.
- Givoni. (1994). "Passive and Low Energy Cooling of Buildings". Van Reinhold. Estados Unidos de América.
- Goluding J., Owen Lewis J. Y Steemers T., (1994). Energy in Architecture. The European Passive Solar Handbook. London: B.T. Bastford Limited.
- Mercado V., Esteves A. (2005) .Sistema de calentamiento solar para viviendas de bajo costo sin fachadas hacia el ecuador AVERMA, Vol. 9; pp. 3.49 – 3.54.

- Mercado V., Esteves A. (2006). Sistema de calefacción solar radiante - variables de diseño y mediciones experimentales. ENTAC.
- M. V. Mercado, A. Esteves y C. Filippín (2007). Sistema de calefacción solar radiante. Mediciones experimentales de invierno y evaluación con software de simulación térmica SIMEDIF. ENCAC.
- Mercado V, Esteves A, Filippín C, Flores Larsen S. (2009). Sistema de calefacción radiante solar pasivo. Diseño, construcción de un prototipo y obtención de resultados. Publicado en ERMA, Vol. 12; pp. 53-61 Publicación Papel (con referato ISSN 0328-932X)
- Mercado M.V., Esteves A., Filippín C. (2010) Comportamiento térmico-energético de una vivienda social de la ciudad de Mendoza. Argentina. Revista Ambiente Construido 10. pp.87-101
- Mercado María Victoria, (30/03/2011). Tesis Doctoral: Sistema de calefacción radiante solar pasivo para el hábitat construido sin fachada disponible hacia el ecuador en Mendoza, Argentina. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta.
- M. Santamouris and D. Asimakopoulos, (2001). Passive cooling of buildings. Second print 2001. Ed. James & James.
- M. Santamouris, K. Pavlou, A. Synnefa, K. Niachou, D. Kolokotsa. (2007). Recent progress on passive cooling techniques: Advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households. Energy and Buildings 39. Pages 859-866.
- Yañez Parareda g. (1982) *Energía Solar edificación y clima*, Tomo I del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo Madrid. pp. 233.