

## EL BALANCE DE RADIACIÓN Y MODELOS DE RADIACIÓN NETA PARA DIFERENTES SUPERFICIES DE SUELO: ESTUDIO EXPERIMENTAL EN MEXICALI, MÉXICO

O. Rafael GARCÍA CUETO<sup>1</sup>, Néstor SANTILLÁN SOTO<sup>1</sup>, Zalia HARO RINCÓN<sup>1</sup>,  
Gonzalo BOJÓRQUEZ MORALES<sup>2</sup>, Margarito QUINTERO NUÑEZ<sup>1</sup>,  
Sara OJEDA BENITEZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería, UABC, Mexicali México

<sup>2</sup>Facultad de Arquitectura y Diseño, UABC, Mexicali México

rafaelcueto@uabc.edu.mx	nsantillan@uabc.edu.mx	haroz@uabc.edu.mx
gonzalobojorquez@uabc.edu.mx	maquinu@uabc.edu.mx	sara.ojeda.benitez@uabc.edu.mx

### RESUMEN

La urbanización, al cambiar las propiedades de la superficie modifica de manera sensible el balance de radiación, y con ello el clima ciudadano. En este artículo se cuantificó ese balance en diferentes superficies para varios días del mes de agosto de 2011 en una ciudad árida del noroeste de México. Se estimó el albedo de cada superficie y propiedades de la atmósfera local como el índice de claridad atmosférica ( $K_0$ ) y la emisividad atmosférica ( $\epsilon_{atm}$ ). Las superficies en las que se realizaron las mediciones fueron asfalto, concreto, poliestireno con pintura elastomérica blanca (PPEB), arcilla y césped. Se encontró que para un ciclo de 24 horas de medición, el mayor valor promedio de radiación neta fue para el asfalto ( $146.1 \text{ W/m}^2$ ), y el menor valor promedio para el PPEB ( $33.6 \text{ W/m}^2$ ). Los valores estimados de albedo varían dependiendo de la superficie, mientras que los de  $K_0$  y  $\epsilon_{atm}$  dependen de las condiciones atmosféricas prevalentes. Se propusieron modelos estadísticos de la radiación neta en función de la radiación solar entrante y la radiación neta de onda corta, encontrándose coeficientes de determinación superiores a 0.97. Se discuten las probables implicaciones de los resultados encontrados hacia el medio urbanizado.

**Palabras clave:** albedo, claridad atmosférica, emisividad atmosférica, modelos de radiación neta.

### ABSTRACT

The process of urbanization, changing the surface properties significantly alters the radiation balance, so this paper proposed to quantify this balance in different surfaces in an arid city of northwest Mexico. The albedo of each surface and other properties of the local atmosphere as the atmospheric clearness index ( $K_0$ ) and atmospheric emissivity ( $\epsilon_{atm}$ ) were estimated. The surfaces, on which the measurements were made, for several days of August 2011, are asphalt, concrete, polystyrene painted with white elastomeric paint (pwep), clay and lawn. It was found that for a 24-hour cycle of measurement, the highest average value

of net radiation was for asphalt ( $146.1 \text{ W/m}^2$ ), and the lowest average value for pwep ( $33.6 \text{ W/m}^2$ ). Estimates of albedo values vary depending on the surface, while the  $K_0$  and  $\varepsilon_{\text{atm}}$  are dependent of the prevailing atmospheric conditions. Statistical models of net radiation as a function of incoming solar radiation and net shortwave radiation were proposed, being in all cases the coefficients of determination higher than 0.97. The likely implications of the results to the built environment are discussed.

**Key words:** albedo, atmospheric clearness, atmospheric emissivity, net radiation models.

## 1. INTRODUCCIÓN

La radiación neta es un parámetro fundamental que gobierna el clima de las capas bajas de la atmósfera; depende críticamente de la estructura y la composición de la atmósfera y la presencia de nubes, además de características superficiales como albedo, emisividad, temperatura, humedad y propiedades térmicas del suelo subyacente. Es además la fuerza impulsora de varios procesos físicos, dinámicos y biológicos, tales como el calentamiento del suelo y el aire, la fotosíntesis y la evapotranspiración, siendo esta última utilizada para optimizar la calidad y rendimiento de los cultivos y la planificación de los recursos hídricos (Geraldo-Ferreira *et al.*, 2011; Bennie *et al.*, 2008; Ji *et al.*, 2009). Es también importante para estudios de balance de energía superficial, donde su magnitud está principalmente relacionada a los flujos de calor sensible y latente (Kalthoff *et al.*, 2006). Respecto a su uso en estudios de clima urbano es un parámetro clave en la relación entre el tipo de superficie urbana subyacente y el balance de energía de radiación (Arnfield, 2003).

La característica básica del paisaje urbano es la heterogeneidad espacial de sus superficies, horizontales y verticales, y esas diferencias conducen a la no uniformidad de transmisión y distribución de radiación y energía. Siendo la superficie urbana una interfase física compleja, las propiedades termodinámicas y cinéticas de las superficies subyacentes pueden cambiar sustancialmente al cambiar las características físicas de esa superficie (Wang y Gong, 2010; Cui et al., 2012). Todos estos factores propician que las características climáticas sean específicas de la ciudad analizada. Muchos estudios previos han analizado las diferencias de radiación urbano-rurales usando modelos climáticos, modelos de ecosistemas terrestres, o modelos computacionales de dinámica de fluidos. Sin embargo, la combinación de diferencias de radiación por la heterogeneidad del paisaje urbano complica explicar los procesos de transformación de energía de diferentes superficies, y las características micro-climáticas al interior de la ciudad no se pueden simular con precisión (Christen y Vogt, 2004). A pesar de su importancia, la radiación neta no se mide rutinariamente porque los radiómetros netos son instrumentos caros y requieren un cuidado constante en el campo. Por lo anterior, para tener una mejor comprensión y claridad de los efectos que diferentes superficies horizontales tienen en el balance de radiación y el probable impacto que ese balance tiene hacia el medio ambiente circundante se realizó una campaña experimental en cinco diferentes materiales en la ciudad de Mexicali, México. La propuesta fue medir las componentes de tal balance en cada superficie, y estimar las características físicas de albedo, índice de claridad atmosférica y emisividad atmosférica. A partir de las mediciones se postulan modelos estadísticos de la radiación neta en función de la radiación solar entrante y la radiación neta de onda corta.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Campaña experimental

Los datos del balance de radiación y los meteorológicos fueron colectados por el Grupo de climatología aplicada del Instituto de Ingeniería de la UABC. Alrededor de la zona hay usos mixtos de suelo, pero el diseño experimental permitió medir lo pertinente de cada superficie. En una plataforma a metro y medio del techo del edificio se colocó un cajón de 2m x 2m x 0.55m, el cual fue relleno previamente con tierra nativa, y sobre ella se colocaron las superficies a medir, a saber: asfalto, concreto, poliestireno pintado con pintura elastomérica blanca (PPEB), césped y arcilla. A una altura de 20 cm. de cada superficie se instaló el radiómetro NR01 cuyas características se explican en la siguiente sección. Cada superficie se midió en un ciclo completo de 24 horas entre el 6 y 25 de agosto de 2011, que es uno de los meses más cálidos en esta región del país, y hasta el momento no se han realizado réplicas de estas mediciones en otros meses del año. Se midió la temperatura de cada superficie con un sensor Pt100 que es un dispositivo termo resistivo; su rango de medición es de  $-75^{\circ}\text{C}$  a  $250^{\circ}\text{C}$ , y su precisión es de  $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2. Balance de radiación

Se midieron las componentes del balance y se utilizó parcialmente el esquema NARP (Net All-Wave Radiation Parameterization, por sus siglas en inglés) en las superficies estudiadas. La energía disponible sobre las superficies se llama radiación neta ( $Q^*$ ), está dada en  $\text{W}/\text{m}^2$ , y se estimó con la ecuación 1.  $Q^*$  es la diferencia entre la radiación de onda corta, entrante ( $K_{\downarrow}$ ) y reflejada ( $K_{\uparrow}$ ), y la radiación de onda larga, entrante ( $L_{\downarrow}$ ) y saliente ( $L_{\uparrow}$ ). El flujo neto de onda corta depende de la radiación solar incidente  $K_{\downarrow}$  y el albedo de superficie  $\alpha_s$ . El flujo neto de onda larga depende de la radiación de onda larga entrante  $L_{\downarrow}$ , la emisividad ( $\epsilon_s$ ) y la temperatura radiante de la superficie ( $T_s$ ):

$$\begin{aligned} Q^* &= K_{\downarrow} - K_{\uparrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} = (1 - \alpha_s) K_{\downarrow} + L_{\downarrow} - \{(1 - \epsilon_s) L_{\downarrow} + \epsilon_s \sigma_s T_s^4\} \\ &= (1 - \alpha_s) K_{\downarrow} + \epsilon_s (L_{\downarrow} - \sigma_s T_s^4) \end{aligned} \quad (1)$$

En la ecuación 1  $\sigma_s$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma_s = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ). Las componentes radiativas se midieron con el radiómetro NR01 que se usa para estudios de balance de energía que requieran calidad científica; tal sensor realiza medidas separadas de la radiación solar (onda corta) y de lejano infrarrojo (longitud de onda larga). La respuesta espectral del radiómetro de onda corta (piranómetro) es de 300-2800 nm en un campo de vista de  $180^{\circ}$ . Su sensibilidad es de 10-40  $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ . Es un piranómetro de segunda clase de acuerdo al sistema de clasificación de la Organización Meteorológica Mundial e ISO 9060. El radiómetro de onda larga (pirgeómetro) tiene una respuesta espectral de 4500-50000 nm, también en un campo de vista de  $180^{\circ}$ . Su sensibilidad es de 5-15  $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ .

### 2.3. Estimación de propiedades físicas

#### 2.3.a. Albedo ( $\alpha_s$ )

Se obtuvo como un cociente de la radiación reflejada y la radiación entrante:

$$\alpha_s = K\uparrow / K\downarrow \quad (2)$$

#### 2.3.b. Emisividad atmosférica ( $\varepsilon_{atm}$ )

Se obtuvo a partir de las mediciones de  $L\downarrow$  y la temperatura del aire (T) en grados Kelvin, empleando la ley de Stefan-Boltzman:

$$\varepsilon_{atm} = L\downarrow / [(5.67 \cdot 10^{-8}) \cdot T^4] \quad (3)$$

#### 2.3.c. Índice de claridad atmosférica ( $K_0$ )

Se obtuvo mediante la radiación entrante de onda corta y la radiación solar extraterrestre:

$$K_0 = K\downarrow / Q_0 \quad (4)$$

$Q_0$  es la radiación solar extraterrestre diaria, que se obtuvo mediante:

$$Q_0 = (24/\Pi) I_{sc} \xi_0 [(\Pi/180) \omega_s (\text{sen}\delta \text{sen}\varphi) + (\text{cos}\delta \text{cos}\varphi \text{sen} \omega_s)] \quad (5)$$

Donde  $I_{sc}$  es la constante solar = 1367 W/m<sup>2</sup>,  $\xi_0$  es el factor correctivo de excentricidad para la distancia media tierra-sol,  $\delta$  es la declinación del sol en grados,  $\varphi$  es la latitud geográfica en grados de la ciudad de Mexicali, B.C. = 32.55°, y  $\omega_s$  es el ángulo horario del orto. Las expresiones para calcular  $\delta$ ,  $\xi_0$  y  $\omega_s$  son las siguientes:

$$\delta = (23.45 \cdot \Pi / 180) * (\text{sen}(2\Pi * (dj + 284) / 365)); \text{ dj es el día juliano} \quad (6)$$

$$\xi_0 = 1 + 0.033 * \text{cos}(2\Pi * dj / 365) \quad (7)$$

$$\omega_s = -\text{cos}^{-1}(-\text{tan} \delta * \text{tan} \varphi) \quad (8)$$

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Balance de radiación

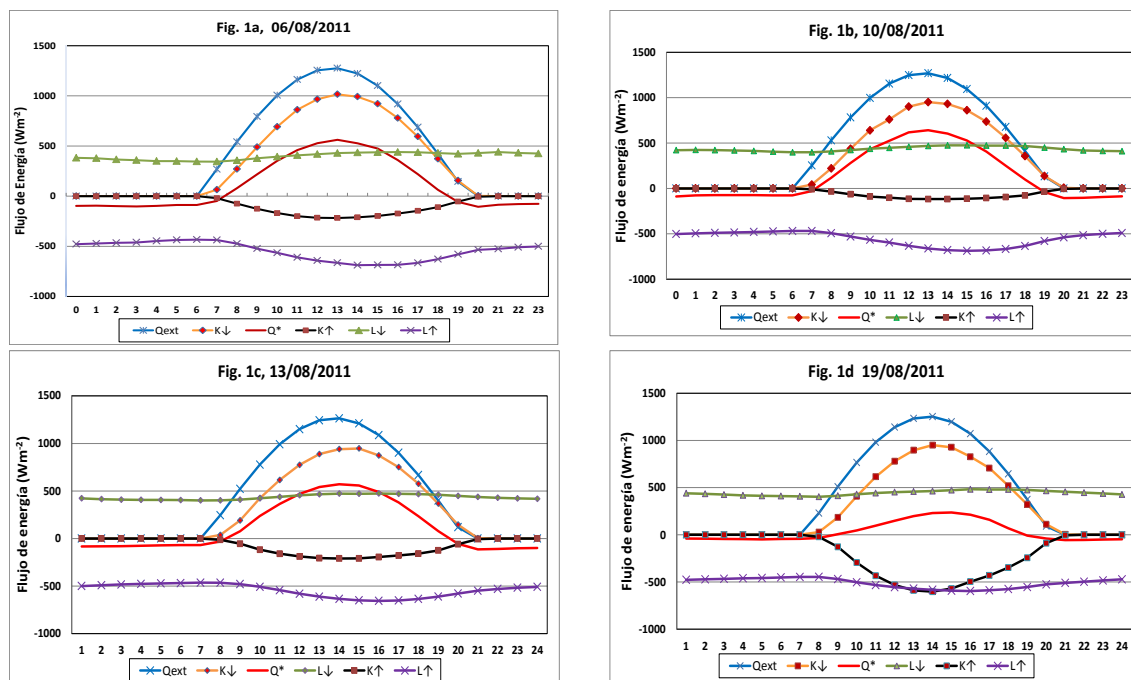
Los valores promedio de las componentes del balance de radiación para las coberturas se muestran en la tabla 1; la precisión esperada es de  $\pm 10\%$  de acuerdo a las especificaciones del fabricante (Hukseflux Thermal Sensors). Dado que las mediciones se realizaron en diferentes días, los valores de  $Q_0$ ,  $K\downarrow$  y  $L\downarrow$  tienen de inicio valores dispares. Al realizar una prueba t de diferencia de medias, con un nivel de significancia de 0.05 entre los valores de  $Q_0$  y  $K\downarrow$  indican que no hay diferencia. Respecto a  $L\downarrow$  no hubo diferencia significativa en los días que se tuvieron mediciones de asfalto, concreto y PPEB, pero sí la hubo cuando se midió en césped y arcilla. Dado que los días estuvieron despejados, parece que factores como el contenido de vapor de agua y aerosoles atmosféricos tuvieron que ver con esa diferencia mostrada. El balance de radiación de cuatro de las superficies se presenta en las gráficas 1 a 4. El patrón diario de  $Q_0$ ,  $K\downarrow$ , y  $Q^*$  tiene un comportamiento parecido con los mayores valores al mediodía solar local en la mayoría de las superficies, sin embargo, el

EL BALANCE DE RADIACIÓN Y MODELOS DE RADIACIÓN NETA PARA DIFERENTES SUPERFICIES DE SUELO: ESTUDIO EXPERIMENTAL EN MEXICALI, MÉXICO

PPEB destaca, respecto a los otros materiales en cuanto a la  $Q^*$ , por la magnitud reducida y el retraso temporal en su valor máximo. La radiación de onda corta saliente,  $K\uparrow$ , al ser función del albedo, muestra un comportamiento diurno dependiente de la superficie subyacente y del ángulo de inclinación de los rayos solares. Respecto a la radiación de onda larga entrante y saliente,  $L\downarrow$  y  $L\uparrow$ , respectivamente, no muestran esa característica ondulatoria de los otros flujos, y con una variación ligeramente mayor en la  $L\uparrow$ .

Fecha	06/08/2011	10/08/2011	13/08/2011	19/08/2011	25/08/2011
	Arcilla	Asfalto	Concreto	PPEB	Césped
$Q_0$	449.9	445.0	441.0	432.2	422.3
$K\downarrow$	340.6	314.1	314.0	303.2	289.5
$K\uparrow$	-79.9	-44.9	-78.3	-199.4	-65.5
$L\downarrow$	399.3	434.7	434.3	443.1	459.3
$L\uparrow$	-546.5	-554.8	-544.1	-512.0	-522.6
$Q^*$	113.6	146.1	123.4	33.6	159.0

Tabla 1: VALORES PROMEDIO DE COMPONENTES DEL BALANCE DE RADIACIÓN EN DIFERENTES SUPERFICIES. SE PRESENTA TAMBIÉN EL VALOR DE  $Q_0$ . TODOS LOS VALORES ESTÁN EN  $W/M^2$



Figs. 1a-1d: Balance de radiación en Mexicali, México en varios días de agosto de 2011. 1a: Arcilla, 1b: Asfalto, 1c: Concreto, 1d: PPEB

### 3.2. Propiedades físicas

La figura 2 muestra la variabilidad del albedo ( $\alpha_s$ ) de las superficies, cuyo rango osciló de 0.12 a 0.82; el asfalto con el valor promedio de 0.19 es el más bajo, mientras que el valor promedio más alto lo tiene el PPEB con 0.69. Así, el asfalto es uno de los principales factores responsable de un ambiente térmico más caliente, porque almacena más radiación solar entrante y refleja menos, mientras que el PPEB ayuda a que el ambiente tenga un calentamiento menor, porque refleja más radiación de onda corta. En los casos de la arcilla, el concreto y el césped, fueron materiales con albedos parecidos, 0.25, 0.27 y 0.26, respectivamente. Respecto a la emisividad atmosférica ( $\epsilon_{atm}$ ) se observa en la figura 3 que el valor promedio más bajo estimado fue de 0.78, en el día que la arcilla era la superficie experimental, mientras que en las demás superficies, la emisividad estuvo muy estable, entre 0.85 y 0.86. Al ser la emisividad dependiente de la radiación de onda larga entrante de la atmósfera y de la temperatura del aire, que a su vez son dependientes del vapor de agua y aerosoles presentes, se observa días muy parecidos en esas propiedades atmosféricas.

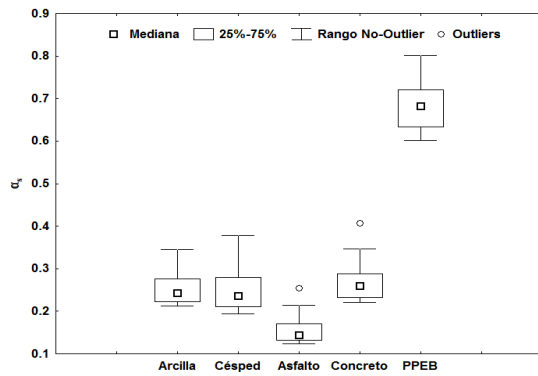


Fig. 2: Variabilidad del Albedo en las superficies estudiadas

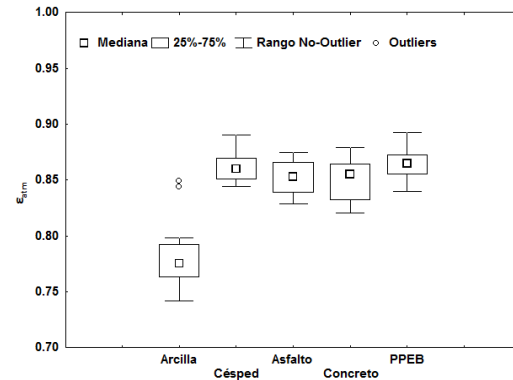


Fig. 3: Variabilidad de la  $\epsilon_{atm}$  en las superficies estudiadas

En cuanto al índice de claridad atmosférica ( $K_0$ ), su promedio estuvo entre 0.69 y 0.73, con el valor más bajo para asfalto, y el más alto para arcilla (Fig. 4). Los valores encontrados no dependen de la superficie, sino más bien indican que en promedio un 30% de la energía que llega al tope de la atmósfera es disipada antes de llegar a la superficie medida.

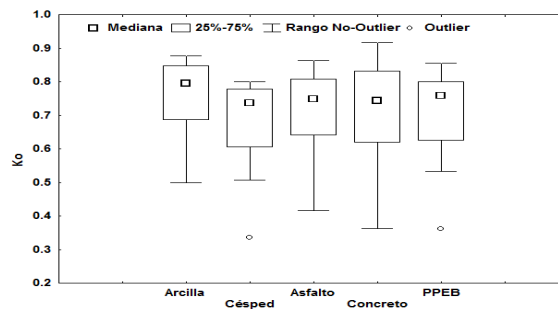


Fig. 4: Variabilidad de  $K_0$  en las superficies estudiadas

### 3.3. Modelos para la radiación neta

Se propusieron dos tipos de modelos, los primeros en función de la radiación solar entrante para cada tipo de superficie; este tipo de modelación consiste en una regresión lineal en la que  $b_0$  y  $b_1$  son los estimadores de las constantes de regresión:

$$Q^* = b_0 + b_1 \cdot K_{\downarrow} \quad (9)$$

Este modelo ha demostrado excelente linealidad en todos los estudios que se han realizado y solidez estadística, particularmente para cielo despejado. Fue necesario aplicar la prueba de Durbin-Watson para asegurar que los residuos no se encuentran correlacionados; se encontró que ningún modelo pasó la prueba, por lo que se utilizó la transformación Cochran-Orcutt para las variables respuesta y predicción de cada una de las superficies estudiadas, encontrándose nuevamente que no fue posible rechazar la hipótesis nula de autocorrelación cero, por lo que será necesario buscar un modelo tipo autoregresivo de media móvil en un posterior estudio. Esto no invalida los modelos propuestos, sin embargo el error cuadrado medio puede subestimar la varianza de los residuales, y la desviación estándar del coeficiente de regresión estimado puede ser inferior a la desviación estándar verdadera. Debido a que los intervalos de confianza y pruebas que usan la distribución  $t$  y  $F$ , ya no son estrictamente aplicables, se utilizaron el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), los errores estándar de los parámetros de regresión y la raíz del error cuadrado medio ( $\sqrt{ECM}$ ) como indicadores de la calidad de los modelos (Tabla 2).

Superficie medida	$b_0$	$b_1$	$\sqrt{ECM}$	$R^2$
Arcilla	-101.3 (6.8)	0.63 (0.01)	25.4	0.99
Asfalto	-88.8 (9.9)	0.75 (0.02)	37.0	0.99
Concreto	-90.8 (9.5)	0.68 (0.02)	35.6	0.99
PPEB	-52.3 (4.8)	0.28 (0.01)	18.2	0.97
Césped	-60.0 (3.7)	0.76 (0.01)	14.1	0.99

Tabla 2: PARÁMETROS Y ERRORES ESTÁNDAR (EN PARÉNTESIS) DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN DE LA EC. 9;  $\sqrt{ECM}$  ES LA RAÍZ DEL ERROR CUADRADO MEDIO Y  $R^2$  ES EL COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN.

Hay una confusión en la naturaleza estadística del modelo reportado por la ecuación 9, y una falla aparente para reconocer claramente la relación entre ese modelo y el proceso real de intercambio de radiación (Gay, 1971), por lo que una relación alternativa es modelar la radiación neta en función del coeficiente de intercambio de onda larga ( $\lambda$ ), basado en la dependencia del flujo neto de onda larga ( $L^*$ ) sobre  $K_{\downarrow}$ . En este nuevo modelo (mejorado) se identifica a  $L^*$  como la variable dependiente, que consiste de dos componentes,  $L_{\downarrow}$  y  $L_{\uparrow}$ :

$$Q^* = (1 + \lambda) K^* + L^*_0 \quad (10)$$

En la que  $K^* = K_{\downarrow} - K_{\uparrow}$ , y  $L^*_0$  es el estimador estadístico de  $L^*$  en  $K_{\downarrow} = 0$ . El caso de  $\lambda$  queda definido por la siguiente ecuación:

$$\lambda = (L^* - b_1)/K^* \quad (11)$$

Los modelos propuestos, que tienen un significado físico importante de acuerdo a la superficie de medición, y a las condiciones atmosféricas prevalentes se presentan en la tabla 3. Los  $R^2$  encontrados no son significativamente diferentes de la primera propuesta, a excepción del PPEB en el que la radiación neta es explicada un 99.4%, en lugar del 97%. En esta propuesta se asume equilibrio radiativo entre la superficie y la atmósfera, es decir, que no se presenta advección en el período de las observaciones. Hay que tener en cuenta que las propiedades y los antecedentes atmosféricos previos tienen algún efecto en la  $L\downarrow$  y en consecuencia en  $L^*$ . Ya que  $L\downarrow$  es generalmente más estable que  $L\uparrow$ , se enfatizan los efectos de la superficie, y por tanto de las diferentes superficies analizadas en este estudio.

Superficie	Modelo	$\sqrt{ECM}$	$R^2$	$\lambda$	$\alpha$	$T_{SUP}$	$T_{MXSUP}$
Arcilla	$Q^* = 0.81K^* - 102.0$	22.3	0.99	-0.19	0.25	39.9	65.2
Asfalto	$Q^* = 0.86K^* - 85.2$	25.1	0.99	-0.14	0.19	42.2	63.5
Concreto	$Q^* = 0.89K^* - 85.4$	25.1	0.99	-0.11	0.27	39.7	58.8
PPEB	$Q^* = 0.79K^* - 48.0$	6.3	0.99	-0.21	0.69	33.3	46.3
Césped	$Q^* = 0.96K^* - 54.9$	6.0	0.99	-0.05	0.26	34.7	44.5

Tabla 3: MODELOS LINEALES PARA ESTIMAR  $Q^*$  EN FUNCIÓN DE LA RADIACIÓN NETA DE ONDA CORTA ( $K^*$ ).  $\lambda$  ES EL COEFICIENTE DE INTERCAMBIO DE ONDA LARGA,  $\alpha$  EL ALBEDO DE SUPERFICIE,  $T_{SUP}$  ES LA TEMPERATURA MEDIA DE LA SUPERFICIE Y  $T_{MXSUP}$  ES LA TEMPERATURA MÁXIMA DE LA SUPERFICIE.  $\sqrt{ECM}$  Y  $R^2$  IGUAL QUE EN LA TABLA 2.

Todos los valores de  $\lambda$  son negativos, lo que implica que las superficies convierten la energía solar absorbida mayormente en calor sensible (Gay, 1971). El valor de  $\lambda$  para césped está próximo al valor cero, lo que implica que parte de la energía se utiliza también para evapotranspiración. De los datos experimentales, se observó una relación inversamente proporcional entre la temperatura de superficie ( $T_{SUP}$ ) y el albedo (tabla 3). Las temperaturas promedio más altas se observaron en la superficie con el albedo más bajo, y viceversa. En el caso del césped, aún cuando el albedo es parecido al de la arcilla y el concreto, por el calor gastado en la evapotranspiración, hace que la temperatura sea más baja que en aquellos. Hay una diferencia importante en la propuesta de los dos modelos, principalmente en la pendiente empírica de las superficies. Se comentan dos superficies contrastantes, asfalto y césped, las cuales prácticamente tienen el mismo valor de pendiente, 0.75 y 0.76, respectivamente (tabla 2). La diferencia en el balance de radiación se debe a diferencias en el albedo, 0.19 y 0.26, respectivamente, y en la manera en que se gasta el flujo de energía. La diferencia de esa pendiente en los dos modelos es notable, por ejemplo, en el PPEB el modelo empírico (ecuación 9) indica que si la superficie absorbe  $1.0 \text{ W/m}^2$  de radiación solar ( $K\downarrow$ ), la radiación neta se incrementaría  $0.28 \text{ W/m}^2$ , sin embargo en el modelo mejorado (ecuación 10) se incrementaría  $0.79 \text{ W/m}^2$ . Por tanto, este modelo muestra que la respuesta es afectada tanto por la superficie como por el albedo.



### 3.4. Implicaciones urbanas

Las superficies más abundantes en la ciudad son asfaltos y concretos, siendo el primero el del albedo menor y el que más contribuye al calentamiento urbano, es decir, es el principal precursor del desarrollo de la isla urbana de calor; el concreto aunque con un albedo menor, pero al ser un material impermeable y carente de evaporación, calienta la superficie, y por ende como calor sensible calienta directamente el aire de los alrededores cercanos. Un material altamente reflectivo es el PPEB, y por tanto el que menos almacenamiento de calor representa para el medio urbanizado; este material se encuentra en los techos de las construcciones. La radiación de onda larga ascendente ( $L\uparrow$ ) en estos tres materiales, en orden de importancia numérica (ver tabla 1) son el asfalto, concreto y PPEB, siendo los dos primeros los que incrementan la carga térmica en los peatones y causan gran incomodidad térmica. Respecto al césped, con un albedo semejante al concreto, debido al fenómeno evapotranspirativo, se encontró que las temperaturas de superficie medidas fueron en promedio 5°C más bajas. El material nativo de la región que es la arcilla, tiene un albedo muy parecido al concreto y al césped; debido a sus propiedades físicas alcanza temperaturas sumamente altas, muy parecidas a las del asfalto, pero durante la noche es el que más enfriamiento tiene (figura 5). Ya que en los alrededores de la ciudad se cuenta parcialmente con esta cobertura (Casillas *et al.*, 2014), en la ciudad de Mexicali se desarrolla la isla urbana de calor, un fenómeno típicamente nocturno.

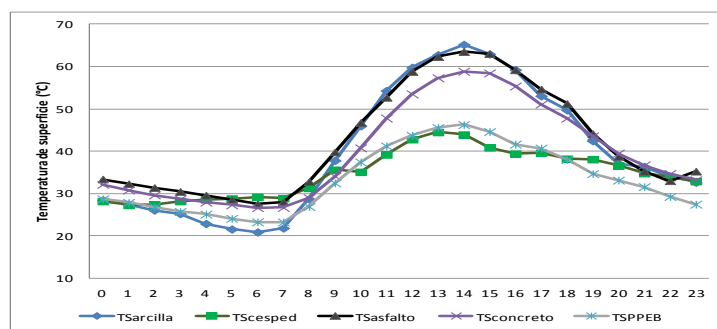


Fig. 5: Comparación de temperaturas sobre distintas superficies en Mexicali, México durante Agosto de 2011

Las propiedades de la atmósfera, como la emisividad y el índice de claridad, permiten visualizar que Mexicali posee condiciones óptimas de transparencia atmosférica por lo que la ganancia neta de radiación solar es alta, así que el manejo de superficies de alto albedo y evapotranspirativas, serían las superficies ideales para disminuir la carga térmica de la población expuesta. Respecto a los modelos para la estimación de la radiación neta es obvio que cualquiera de las dos propuestas da muy buenos resultados, sin embargo es la segunda de ellas, tanto por la física involucrada como por la mejora en la explicación en función del coeficiente de determinación que se recomienda su utilización.

#### 4. CONCLUSIONES

Se encontró que la radiación neta es diferente dependiendo de la superficie de medición. Para un ciclo de 24 horas en agosto de 2011, el mayor y menor valor promedio de radiación neta fue para el asfalto con  $146.1 \text{ W/m}^2$ , y PPEB con  $33.6 \text{ W/m}^2$ , respectivamente. Esta diferencia se debe al albedo de cada superficie, pues la emisividad atmosférica y el índice de claridad atmosférica tuvieron básicamente los mismos valores en los diferentes días del experimento. El mayor albedo lo tuvo el PPEB, con 0.69, y el menor valor el asfalto con 0.19. Así, el asfalto es uno de los principales factores responsable de un ambiente térmico más caliente, porque almacena más radiación solar entrante y refleja menos, mientras que el PPEB ayuda a que el ambiente tenga un calentamiento menor, porque refleja más radiación de onda corta. En cuanto al césped, por la partición de su energía a un flujo evapotranspirativo, es el que tuvo la temperatura máxima más baja de los cinco materiales estudiados. En cuanto a los modelos para estimar la radiación neta en función de la radiación solar entrante y la radiación neta de onda corta, se encontró en todos los casos coeficientes de determinación superiores a 0.97, pero se recomienda su estimación con el modelo mejorado por la física involucrada en la propuesta. Se debe continuar con las mediciones para lograr inferencias válidas y propuestas de modelos que tomen en cuenta los errores autocorrelacionados.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- Arnfield A.J. (2003). Two decades of urban climate research, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.* 23: 1-26.
- Bennie B.H.J., Wiltshire A., *et al.* (2008). Slope, aspect and climate: Spatially explicit and implicit models of topographic microclimate in grassland. *Ecol. Model.* 216(1): 47-59.
- Casillas H.A., García-Cueto O.R., *et al.* (2014). Detección de la Isla Urbana de Calor mediante Modelación Dinámica: Caso Mexicali, México. *Inf. Tecn.* (Aceptado).
- Cui Y P, Liu J Y, *et al.* (2012). Modeling the radiation balance of different urban underlying surfaces. *Chin. Sci. Bull.* 57: 1046-1054
- Christen A. and Voogt R. (2004). Energy and radiation balance of a central European city. *Int. J. Climatol.* 24: 1395-1421.
- Geraldo-Ferreira A., Soria-Olivas E., *et al.* (2011). Modelling net radiation at surface using “in situ” net pyradiometer measurements with artificial neural networks. *Expert Systems with Applications* 38: 14190-14195.
- Gay W.L., (1971). The regression of net radiation upon solar radiation. *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, Ser. B 19: 1-14.
- Ji, X., Kang, E., *et al.* (2009). Simulation of heat and water transfer in a surface irrigated, cropped sandy soil. *Agric. Water Manag.* 96(6), 1010-1020.
- Kalthoff N., Fiebig-Wittmaack M., *et al.* (2006). The energy balance, evapo-transpiration and nocturnal dew deposition of an arid valley in the Andes. *J. Arid Environ.* 65: 420-443.
- Wang X.Q. and Gong Y.B. (2010). The impact of an urban dry island on the summer heat wave and sultry weather in Beijing City. *Chin. Sci. Bull.* 55: 1657-1661.