

Energy flows influence on thermal comfort of outdoor spaces

Marina González, María V. Machado y Helen Barroso

*Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura, Universidad del Zulia,
Apartado Postal 15399, Maracaibo, Venezuela.*

E-mail: magonzal@luz.ve, mmpenso@hotmail.com, hbarroso@luz.ve

Abstract

Maracaibo, the second city of Venezuela (1.7 million of inhabitants), has the highest energy consumption index per capita of Latin America, which is a product of the lack of adaptation of the architecture to the environment's climate. This situation increases considering that the exterior spaces are designed without any climate control, producing dangerous consequences to the users and to the environment. The main purpose of the research commented in this paper, is to determine, for hot and humid climates, in which proportion the exterior spaces energy flows intervene in the human thermal comfort. The applied procedure considers monitoring and computer simulation of exterior spaces already built. These are analysed comparing the energy gains and loss and the Stress Thermal Index of the human body, under a locally adapted methodology, based on the one used for the exterior areas of Expo'92 in Sevilla. After the analysis of different variables, design strategies are proposed for the exterior spaces of hot and humid climates.

Key words: Outdoor spaces, human thermal comfort, heat flow, exterior bioclimatic strategies, hot humid climate.

Influencia de los flujos energéticos en el bienestar térmico en espacios exteriores

Resumen

Maracaibo, segunda ciudad de Venezuela (1.7 millones de habitantes), posee el mayor índice de consumo energético per cápita de América Latina, lo cual es producto de la falta de adecuación de la arquitectura al entorno ambiental climático. Esta situación se acentúa debido a que los espacios exteriores son diseñados sin ningún tipo de control bioclimático, lo que produce graves consecuencias en los usuarios y al medio ambiente en general. El objetivo principal de la investigación, que se documenta aquí, es determinar, para climas cálidos húmedos, en qué proporción intervienen los flujos energéticos de los espacios exteriores sobre el bienestar térmico humano. El procedimiento utilizado contempla el monitoreo y la simulación computarizada de espacios exteriores construidos. Éstos son analizados comparando los valores obtenidos de ganancias y pérdidas energéticas y el Índice de Estrés Térmico en el cuerpo humano, bajo una metodología, adaptada a las condiciones locales, basada en la propuesta para la evaluación de espacios exteriores de la Expo'92 en Sevilla. Luego de analizar las diferentes combinaciones de variables, se proponen en orden de importancia estrategias de diseño para espacios exteriores de climas cálido-húmedo.

Palabras clave: Espacios exteriores, confort térmico humano, flujo de calor, estrategias bioclimáticas para exteriores, clima cálido-húmedo.

Introducción

A través de la historia se puede observar como se ha dado una respuesta a las condiciones adversas del clima, mediante el acondicionamiento térmico, tanto de la arquitectura como de espacios exteriores, para facilitar la adaptación del hombre al medio. Sin embargo, se ha hecho más evidente en los primeros que en la segunda, lo cual ha sido, fundamentalmente, hecho de forma intuitiva.

El cambio de latitud acompañada por las variables geográficas y meteorológicas determina cuáles son las variables climáticas que inciden en el confort térmico de los individuos. Por ejemplo, en climas cálidos secos y latitudes medias el malestar térmico es causado por la temperatura del aire y la radiación. En tanto que, para los climas cálidos húmedos y latitudes intertropicales la temperatura del aire no es la principal causante del malestar térmico, ya que la mayor parte del tiempo ésta se mantiene por debajo de la temperatura del cuerpo humano, posibilitando la eliminación de calor por convección. Lo que si es posible es que ese malestar sea causado, bien, por la incidencia de la radiación solar, que provoca el calentamiento de las superficies de los materiales y de la piel de las personas; y/o, por los altos valores de humedad relativa respecto a la temperatura del aire.

El Grupo de Termotecnia y el Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos de la Universidad de Sevilla quienes elaboraron una tabla con el porcentaje de intervención de esos flujos, para las condiciones del verano en el clima seco de la ciudad de Sevilla (latitud media), la cual fue utilizada para el acondicionamiento de los espacios exteriores de la Expo '92.

Esos cálculos del balance térmico, en condiciones de verano y climas cálidos, se basaron en que "una clara situación confortable es la ausencia total de sudoración" [1], por lo cual para el diseño de los diferentes espacios abiertos se flexibilizó la condición, aplicándose, según la intensidad de acondicionamiento requerida, unos niveles variables de sudoración mínimos. Así, para las zonas de tránsito se estableció un grado de sudoración de 90g/h, lo que indica un nivel medio de acondicionamiento; mientras que para las zonas de estancia o permanencia, el índice se ubicó por debajo de 60g/h, lo que responde a una alta necesidad de acondicionamiento (Tabla 1) [1].

Para el caso específico de Maracaibo, clima cálido húmedo intertropical, no se han realizado estudios que determinen los niveles de incidencia de estos aspectos y de otras variables que son trascendentes en el confort humano, en los espacios exteriores, lo que hace necesario identificarlos para poder calibrar los elementos de

Tabla 1. Balance térmico de un individuo expuesto a las condiciones climáticas de un día caluroso en Sevilla a las 14 h [1]

	Componente del balance	Cuantía (W)	Porcentaje (%)	Contabilidad Externa
Garancias sobre el ocupante	1 generación neta	60	24	No Controlable
	2 Radiación total (directa + difusa + reflejada)	135	55	Controlable
	3 Intercambio radiante de larga	35	14	Controlable y susceptible de ser negativa
	4 Convección	15	7	Controlable y susceptible de ser negativa
	Total Ganancias	245	100	-
Pérdidas sobre el ocupante	5 Intercambio con la bóveda celeste	25	11	Controlable
	6 Sudoración	220	89	Controlable su efectividad real
	Total Pérdidas	245	100	

acondicionamiento que pudieran mejorar estos espacios.

El acondicionamiento adecuado a las condiciones del clima de espacios exteriores propicia el confort de los usuarios y la disminución de las cargas térmicas que afectan las edificaciones. Por ello, el objetivo principal de este trabajo es determinar, para el clima cálido húmedo de Maracaibo, en qué proporción intervienen los flujos energéticos de los espacios exteriores sobre el bienestar térmico humano bajo una metodología basada en la propuesta para la evaluación de espacios exteriores de la Expo'92 en Sevilla, que fue adaptada a las condiciones locales; y, complejizada mediante la inclusión de variable que implican mayor precisión en el análisis.

Metodología

El balance térmico se produce cuando el cuerpo pierde y gana calor a la velocidad adecuada, manteniendo su temperatura en 37°C logrando equilibrar los intercambios energéticos. Si las pérdidas son más rápidas, generan sensaciones de frío; pero, si la velocidad es menor se produce sensación de calor.

Esa es la base de la ecuación de balance energético entre el cuerpo humano, ubicado en el exterior, y el ambiente circundante, que se aplica para evaluar un espacio exterior localizado en la ciudad de Maracaibo. Para ello, se ha generado una herramienta que considera la proporción de los flujos de calor en el exterior y cómo intervienen cada uno de ellos en el balance térmico entre el cuerpo humano y el medio ambiente.

Herramienta

La herramienta para el cálculo del balance energético se ha construido basada en:

- La ecuación fundamental de balance de calor entre el hombre y el medio [2], fundamentada en una combinación de formulaciones de diferentes autores [1, 2, 3, 5].
- El cuerpo humano fue considerado realizando una misma actividad, caminar ligero que genera 169 W durante las 24 horas, con el propósito de equivaler las condiciones durante día y noche y poder observar el efecto de las variaciones del ambiente sobre él.

- La fusión de datos de: i) las mediciones en campo realizadas en un modelo de estudio durante un periodo de tres días consecutivos (8 al 10/02/2000) de las variables: temperatura del aire; temperatura superficial; velocidad del aire; y, ii) las registradas en la estación meteorológica del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño de LUZ ubicada en el área urbana de la ciudad de Maracaibo.
- Los datos obtenidos del cálculo del factor solar proveniente del programa computarizado CODYBA [6] y de la hoja de cálculo de irradiancia sobre superficies con cualquier orientación e inclinación.
- Los datos registrados en las mediciones fueron utilizados para calibrar la herramienta.

Los flujos energéticos considerados en la herramienta se describen en los siguientes párrafos:

La actividad metabólica y el intercambio de calor entre el medio y el cuerpo humano, se pueden calcular a través de la siguiente expresión:

$$M - W = \pm CV \pm R \pm CC \pm RS + EV + D \quad (1)$$

La *velocidad de metabolismo*, se mide generalmente por la cantidad de oxígeno consumido, y puede calcularse [4] mediante la siguiente ecuación:

$$M = (0,23 \cdot RQ + 0,77) \cdot (5,87) \cdot (V_D^2) \cdot (60 / Ac) \quad (2)$$

La *energía mecánica efectiva exterior*, no es más que el trabajo del cuerpo humano, y la relación M/W indica la eficiencia del cuerpo humano cuando realiza una acción específica.

Los *intercambios de calor por convección* se producen desde la piel al aire o al fluido que rodea el cuerpo, o en sentido contrario. Este intercambio depende de la superficie expuesta, la resistencia de los elementos impuestos, pero más de la diferencia entre la temperatura de la piel y el entorno. Estos intercambios pueden calcularse mediante la siguiente expresión [5]:

$$CV = f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad (3)$$

El coeficiente de transmisión por convección se determina dependiendo del modo de transferencia de calor, si es por convección libre, la ecuación será [5]:

$$hc = 2,38 * (tcl - ta) \quad (4)$$

Si es por convección forzada, será [5]:

$$hc = 12,1 * \sqrt{(v)} \quad (5)$$

El factor de vestimenta está directamente relacionado con la resistencia térmica de la ropa y se expresa a través de la siguiente ecuación [5]:

$$fcl = 1 + 0,2 * Icl \quad \text{para } Icl < 0,5 \text{ clo} \quad (6)$$

$$fcl = 1,05 + 0,1Icl \quad \text{para } Icl > 0,5 \text{ clo} \quad (7)$$

Los intercambios por radiación entre el cuerpo humano y el ambiente incluyen: la fracción de energía solar directa, reflejada y absorbida por la piel y la fracción de onda larga a través de la emisión entre el cuerpo y el entorno.

La ecuación que rige el cálculo para el flujo de radiación de onda corta es [1]:

$$Rc = (\alpha_{sk} * \tau_{cl} * H) / f_{cl} \quad (8)$$

Para el cálculo de la radiación solar incidente sobre la superficie corporal (H), se utilizó la siguiente ecuación [2]:

$$H = \%sr * IG \quad (9)$$

Los intercambios de radiación por onda larga se expresan mediante la ecuación [5]:

$$R = f_{eff} * fcl * \epsilon * \sigma * (tcl^4 - tmr^4) \quad (10)$$

El intercambio de calor por conducción a través de la vestimenta se produce entre el cuerpo humano cuando se encuentra en contacto directo con un cuerpo sólido. La ecuación que rige su cálculo es la siguiente [5]:

$$CC = hcl * (tsk - tcl) \quad (11)$$

El coeficiente de transferencia de calor por conducción se obtiene a través de [5]:

$$hcl = 1 / (0,155 Icl) \quad (12)$$

La temperatura media de la piel puede calcularse mediante [1]:

$$tsk = 29,55 + 0,196 * Ta - 1,064M * (1 - 0,295 * Icl) \quad (13)$$

La temperatura de la superficie de la vestimenta se obtiene mediante:

$$Tcl = 35,7 - 0,028 * (M - W) - 0,155 * Icl * \{ (M - W) - 3,05 * 10 - 3 * [5733 - 6,99 * (M - W) - pa] - 0,42 * [(M - W) - 58,15] - 1,7 * 10 - 5 * M * (5867 - pa) - 0,0014 * M * (34 - Ta) \} \quad (14)$$

Los intercambios de calor sensible y latente debidos a la respiración son proporcionales al volumen de aire de los pulmones, el cual a su vez es proporcional al volumen metabólico y están expresados de la siguiente forma [5]:

$$RSs = 0,0014 * M * (34 - ta) \quad (15)$$

$$RSI = 1,72 * 10^{-5} * M * (5867 - pa) \quad (16)$$

Las pérdidas por evapotranspiración, son producto de cuatro procesos: 1) secreción de las glándulas situadas cerca de la superficie de la piel; 2) transferencias a través de conductos de la superficie de la piel; 3) difusión de la forma de película fina sobre las superficies de la piel; 4) evaporación de esta película a la temperatura de la piel [4].

Las pérdidas por evapotranspiración cuando la temperatura del cuerpo es regulada, se obtienen mediante la siguiente ecuación:

$$E_{sw} = D + Er_{sw} \quad (17)$$

La difusión de vapor de agua desde la piel depende de la diferencia entre la presión de vapor de saturación del aire y la de la piel y se expresa a través de

$$D = 3,05 * 10^{-3} * (p_{ss} - p_a) \quad (18)$$

La pérdida de calor removida por la película de sudor viene expresada mediante [5]:

$$Er_{sw} = \eta_{sw} * (E_{sw})_{max} \quad (19)$$

donde:

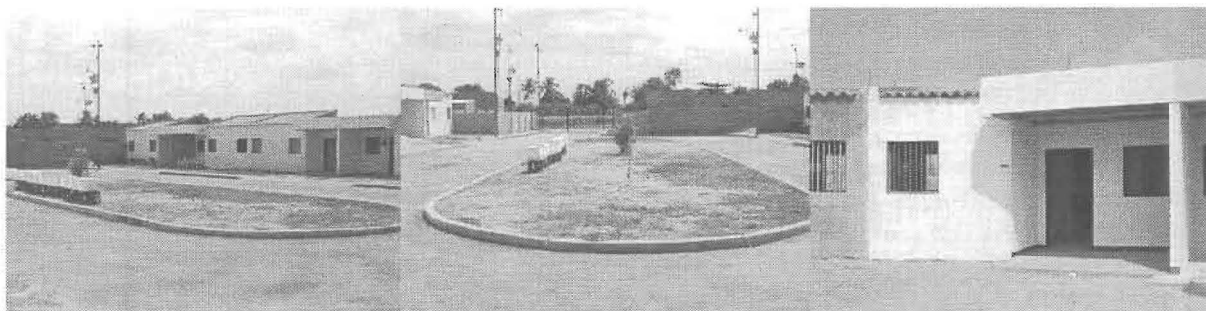


Figura 1. Vista del condominio.

$$j_{sw} = 1 / (1 + h/h_{cl}) \quad (20)$$

$$(E_{sw})_{max} = 16,7 * f_{pcl} * h_c * (p_{ss} - p_a) \quad (21)$$

$$f_{pcl} = 1 / (1 + 0,143h_c/h_{cl}) \quad (22)$$

Modelo de estudio

Nueva Democracia es una urbanización que comprende 900 viviendas en 25 hectáreas, en cuyo desarrollo proyectual intervinieron la propia comunidad, el gobierno estatal y la Universidad del Zulia. La estructura de desarrollo urbanístico (40% contruido) fue concebida para promover la organización social de las comunidades, la cual está representada físicamente en tres niveles: el global, por el complejo de viviendas; el intermedio por las agrupaciones de 12 a 30 viviendas dispuestas alrededor de un espacio comunitario llamado condominio y, el tercer nivel, el básico conformado por la vivienda y la parcela.

El nivel seleccionado para este estudio fue el intermedio, estando el condominio estudiado constituido por 15 viviendas, dispuestas en forma pentagonal y conformando un espacio común en forma elipsoidal, bordeado por la vialidad interna, cuyas proporciones se muestran en la Figura 1. El espacio común estaba para el momento de estudio compuesto por materiales rudimentarios: arena, capa vegetal escasa, concreto y asfalto, expuestos completamente a la radiación solar (Figura 2).

Resultados

Al analizar el bienestar térmico durante 24 horas en el espacio de condominio de Nueva Democracia, en función de los gramos de sudoración, se observa que el sujeto para restablecer las



Figura 2. Planta del condominio.

condiciones de bienestar durante las horas de máxima temperatura y radiación solar, tendría que evapotranspirar más de 1000g/h de sudor. Esto resultaría imposible, dado que, el cuerpo humano pierde líquidos y sales corporales, deshidratándose.

La imposibilidad de alcanzar el confort por esta vía, se basa en que las tasas de sudor aceptables para el cuerpo humano se sitúan entre los 60 y 100g/h, las cuales representan una potencia de enfriamiento de 70W, muy inferior a las 169W que implica la actividad básica que se le atribuye al modelo corporal utilizado para este análisis.

Comparando los flujos energéticos de espacios exteriores en ciudades con climas cálidos húmedos, como Maracaibo, con los espacios exteriores de ciudades con climas cálidos secos, como el caso de la ciudad de Sevilla, se observa que: durante el día en ambas ciudades, los flujos que tiene mayor incidencia son la radiación solar directa, difusa y reflejada; en tanto que las pérdidas por evaporación se hacen más factibles

en Sevilla, ya que el contenido de humedad del aire es 30% menos húmeda que la ciudad de Maracaibo.

Los valores obtenidos a través de las simulaciones realizadas con la herramienta desarrollada demuestran que durante el día la radiación solar representa un 51% sobre los flujos energéticos en los espacios exteriores; ya que el cuerpo humano está totalmente expuesto a la radiación solar (Figura 3).

Durante el periodo nocturno las ganancias de calor sobre el cuerpo son generadas por la actividad (33%), la emisión de onda larga de las superficies del entorno (20%), debido a la acumulación de calor en los materiales producto de las horas de insolación. Mientras que el cuerpo humano está perdiendo calor por convección (19%), conducción (12%) y evapotranspiración (11%) (Figura 4).

Si la proporción de calor se determina durante el periodo de 24 horas, la radiación solar de onda corta interviene en un 36% aportando 6503,32w de calor; el flujo de calor por convección interviene en un 10%, perdiendo 1811,88w de calor; el flujo de radiación de onda larga en un 11%, generando 1972,58w de calor; las pérdidas evapotranspirativas en un 11% con 2046w; y la actividad en un 22% (Figura 5 y 6).

Para el sujeto analizado que realiza una actividad generadora de 169W de calor durante las 24 horas, se observa que: desde las 17 hasta las 7 horas se encuentra perdiendo calor por convección, conducción, radiación de onda larga, evapotranspiración y respiración, debido al enfriamiento convectivo nocturno y a las pérdidas de calor por radiación entre el espacio estudiado y la bóveda celeste; y desde las 8 hasta las 16 horas, se encuentra ganando calor mediante la radiación solar, directa, difusa, reflejada, la radiación de onda larga y la actividad que realiza (Figura 7).

Conclusiones

De acuerdo al estudio realizado sobre el espacio exterior del condominio seleccionado en "Nueva Democracia", éste no reúne las características mínimas para producir bienestar durante el periodo diurno, debido a que sus superficies no están protegidas de la radiación solar. Esta condición, por el contrario es favorable para las

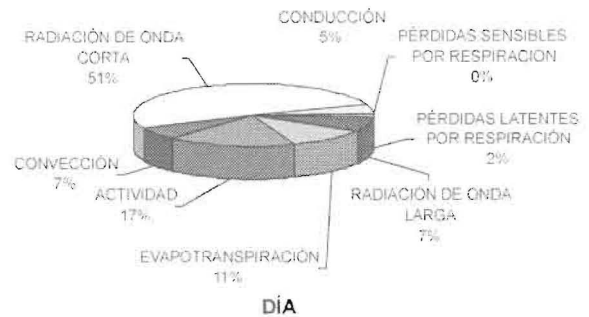


Figura 3. Proporción de los flujos de calor durante el periodo diurno.

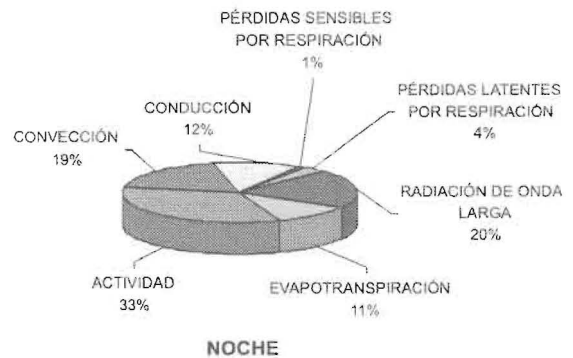


Figura 4. Proporción de los flujos de calor durante el periodo nocturno.



Figura 5. Proporción de los flujos de calor durante las 24 horas.

horas nocturnas, ya que estas superficies liberan el calor por radiación y convección que ha sido acumulado en el día, resultando un espacio externo con condiciones bioclimáticas adecuadas durante el periodo nocturno.

Para establecer estrategias de diseño bioclimático en espacios exteriores con las características del espacio estudiado, deben diferenciarse las condiciones y usos diurnos de los nocturnos, ya que durante el día la variable que tiene mayor

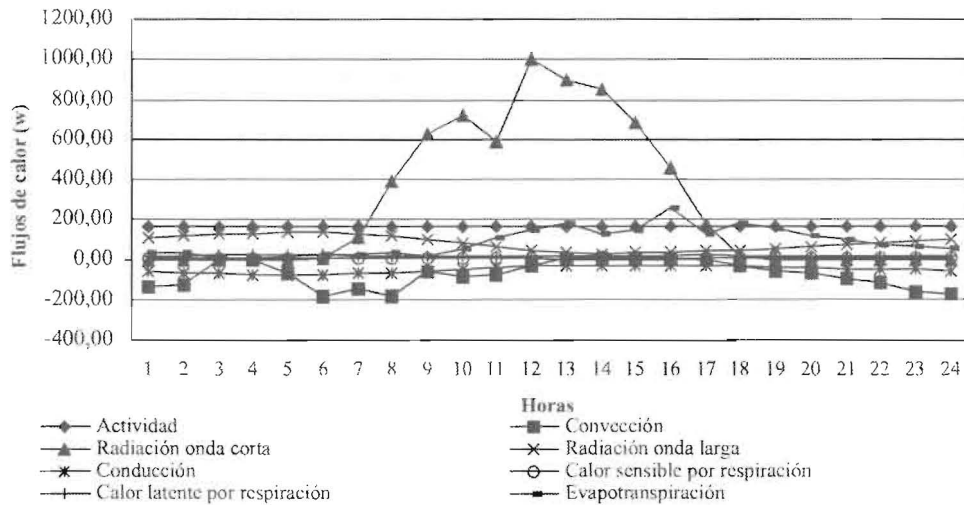


Figura 6. Comportamiento de los flujos de calor durante 24 horas.

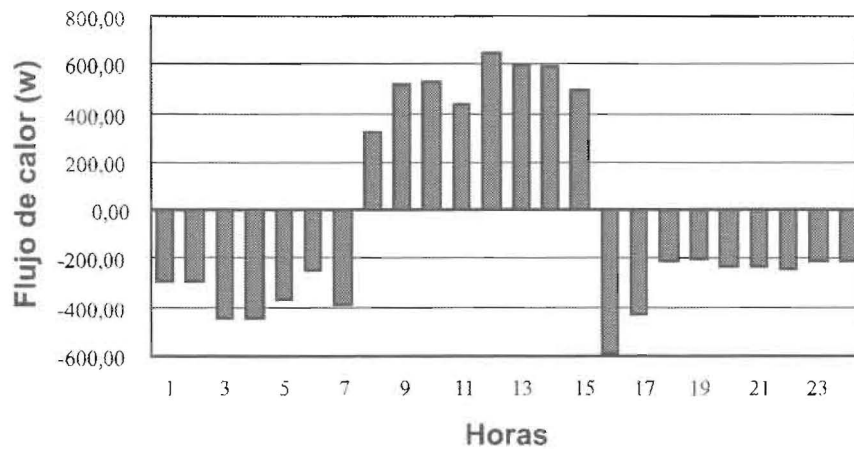


Figura 7. Balance energético entre el cuerpo humano y el entorno.

incidencia sobre éstos es la radiación solar de onda corta; mientras que durante la noche las proporciones de los flujos son similares para la convección, radiación de onda larga y actividad metabólica.

Las estrategias de acondicionamiento climático en espacios exteriores, serán: durante el día la ventilación en sombra; y, en la noche la liberación de calor mediante convección y radiación nocturna.

En condiciones exteriores las estrategias deben dirigirse a incrementar las pérdidas y reducir las ganancias de calor, mediante: la disminución de la radiación directa, difusa y reflejada, el movimiento del aire; y la utilización de los elementos vegetales.

La jerarquía de las estrategias mencionadas dependerá de las proporciones de calor que intervienen para el momento del día en que se está utilizando el espacio exterior. Esto es, si el espacio es utilizado durante el período diurno, la primera estrategia será proteger al usuario del impacto de la radiación; la segunda el incremento de las corrientes de aire; la tercera, debe dirigirse al uso de superficies de baja emisividad.

Mientras que para el período nocturno, la primera opción debe estar dirigida tanto al incremento de las corrientes de aire como a las pérdidas de calor por radiación de las superficies.

Las adecuadas proporciones, que deberán ser objeto de otra investigación, y materiales del

entorno en climas cálidos húmedos, pueden ser una importante manera de producir bienestar en las áreas exteriores, al mismo tiempo que beneficia el confort térmico interior de las edificaciones y otros espacios que lo circundan, ya que todos conforman un sistema de intercambio que necesariamente debe ser considerado en conjunto y no limitado a cada individualidad.

Agradecimientos

CONDES, Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura, Adriana Herrera.

Nomenclatura

σ : Constante Steffan Boltzman $5,67 \cdot 10^{-8}$
 ε : Emisividad del arropamiento
 τ_{cl} : Transmisividad del vestido
 $(E_{sw})_{max}$: pérdidas por evaporación cutánea cuando la piel está completamente mojada
 f_{pcl} : Porosidad de la ropa
 α_{sk} : Absortividad de la piel
 η_{sw} : Eficiencia de las pérdidas por sudoración
 A : Energía Acumulada
 Ac : Área del cuerpo, $Ac=0,202 \cdot w^{0,425} \cdot h^{0,725}$, w es el peso y h corresponde a la altura
 CC : Intercambios por conducción
 CV : Intercambios por convección
 D : Difusión de Vapor de agua desde la piel
 E_{rsw} : Pérdidas evaporativas de una película de sudor
 E_{sw} : Pérdidas totales por evaporación cutánea
 EV : Pérdidas por evapotranspiración
 f_{cl} : Factor del área de arropamiento
 f_{cl} : Relación entre el área de la ropa y la piel
 f_{eff} : Factor del área efectiva de la radiación
 h : Coeficiente combinado de transferencia de calor por convección y radiación
 H : Radiación solar incidente sobre la superficie de la piel
 hc : Coeficiente de transmisión por convección
 hcl : Coeficiente de transferencia de calor por conducción

I_{cl} : Resistencia del arropamiento
 IG : Radiación solar
 M : Velocidad del metabolismo
 p_a : Presión de vapor de saturación a la temperatura del aire
 Pa : presión de vapor del aire
 p_{ss} : Presión de vapor de saturación a la temperatura de la piel
 R : Intercambios por radiación
 Rc : Intercambios por radiación de onda corta
 RQ : La relación entre el oxígeno inhalado y el CO_2 exhalado, este puede variar entre 0,7 en reposo y más de 1 en ejercicios fuerte.
 RS : Intercambios de calor latente (evaporación respiratoria) y sensible producidos en la respiración
 RSI : Intercambios de calor latente por respiración
 RSs : Intercambios de calor sensible por respiración
 sr : Superficie de vestimenta
 ta : Temperatura del aire
 tcl : Temperatura de la superficie del arropamiento
 tmr : Temperatura media radiante
 tsk : Temperatura promedio de la piel.
 v : Es la velocidad del viento en m/s.
 V_D^2 : Volumen de aire, utilizado en la respiración
 W : Energía Mecánica efectiva exterior

Referencias Bibliográficas

1. Alvarez, S. *et al.* Control climático en espacios abiertos. Grupo Termotecnia. Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos, Universidad de Sevilla. 1992.
2. Neila, J. Diseño de ambientes exteriores. Cuadernos del Instituto Juan de Herrera de la Escuela de Arquitectura de Madrid. 1999.
3. Neila, J and Bedoya, C. Técnicas Arquitectónicas y Constructivas de Acondicionamiento Ambiental 1. Ediciones Munilla-Lería. 1997.
4. ASHRAE. Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 1997.

5. Awbi, H. Ventilation of Buildings. Department of Construction Management and Engineering, University of Reading. E&FN Spon. 1991.
6. Brau, J, Roux, J and Depecker, P. Micro-informatique et comportement thermique des bâtiments en régime dynamique: CODYBA. Génie Climatique. 1987.

Recibido el 12 de Marzo de 2001

En forma revisada el 29 de Noviembre de 2002