

EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO URBANO POR MEDIO DE LA TEMPERATURA FISIOLÓGICA EQUIVALENTE (PET), EN LA CIUDAD DE MENDOZA.

S. E. Puliafito¹, G. P. Ortiz², C. M. Puliafito³.

¹Grupo de Estudios de la Atmósfera y el Ambiente. (GEAA) Universidad Tecnológica Nacional- Facultad Regional Mendoza (UTN-FRM) – Rodríguez 273. C.P. 5500 – Mendoza – <http://www.frm.utn.edu.ar/geaa/>
Tel. 0261-5243003 e-mail: epuliafito@frm.utn.edu.ar

³Instituto de Alta Frecuencia y Microondas de la Facultad de Ingeniería, DICYT, Universidad de Mendoza.
Boulogne Sur Mer 683 – CP 5500 Mendoza.

RESUMEN: La climatología urbana se ha dedicado a estudiar los balances de energía de la ciudad a fin de establecer las relaciones de temperatura y humedad en su entorno. Debido a la fuerte interacción entre el hombre y el ambiente construido, la ciudad puede modificar el balance térmico establecido. El presente trabajo estudia el confort biometeorológico bajo diversas condiciones constructivas y de verde urbano de la ciudad de Mendoza. Para lo cual se han recopilado datos de dos años de mediciones simultáneas entre diferentes puntos. Uno de los indicadores bioclimáticos actualmente más usado es el PET (Physiological Equivalent Temperature). Se presenta el uso de PET el cual muestra diferencias de hasta 15°C entre zonas bajo la corona de especies arbóreas y zonas hormigonadas. Se concluye en la necesidad de seleccionar y preservar especies arbóreas debido a su rol en la disminución de la radiación directa y consecuentemente mejora del confort.

Palabras clave: Biometeorología, Temperatura Fisiológica Equivalente, confort urbano, Verde Urbano.

INTRODUCCIÓN

Los complejos y dinámicos procesos de crecimiento urbano, que dan como resultado la aparición del efecto de isla de calor e isla seca, requieren desarrollar estudios que no solo identifiquen y describan estos fenómenos, sino que, por el contrario, permitan adelantarse a estos sucesos, con una adecuada planificación que incluyan todos los factores bioclimáticos.

Para la evaluación del confort urbano se deben tener en cuenta cuatro parámetros principales; la estética de la calle, ruidos, la calidad del aire y el estrés térmico. De los cuales uno muy importante es éste último el cual influye sobre el confort humano en las ciudades. El presente trabajo se dedica al estudio del estrés térmico en diferentes zonas de la ciudad y como influyen los parámetros constructivos y de distribución de los espacios verdes sobre este parámetro.

Desde la década del 80, del siglo pasado, la climatología urbana se ha dedicado a estudiar los balances de energía de una ciudad a fin de establecer las relaciones de temperatura y humedad en su entorno. Sin embargo debido a la fuerte interacción entre el hombre y el ambiente construido, la ciudad puede alterar o modificar el balance térmico establecido. Es por ello que actualmente existe una nueva rama de estudio que incluye el confort biometeorológico, donde coinciden el clima urbano, el confort y la planificación urbana.

Sin embargo, uno de los primeros pasos para establecer el balance biometeorológico adecuado, exige encontrar una definición adecuada del confort. En la práctica el problema se reduce a lograr un índice que sea capaz de medir la “temperatura efectiva” de la superficie del cuerpo (a nivel de la piel), a través de una sensación térmica que el organismo experimenta realmente. Pero esa temperatura efectiva, según distintos autores, es consecuencia no sólo de la temperatura ambiente, sino también de la temperatura biológica y, sobre todo, del enfriamiento del cuerpo a través del viento y la humedad, que al actuar sobre la evapotranspiración, modifican el proceso térmico. (Bochaca y Puliafito, 2007; Bochaca et al., 2008)

Uno de los indicadores bioclimáticos actualmente más usado es el PET (Physiological Equivalent Temperature), este indicador permite comparar las condiciones externas, en general complejas, con la experiencia de la temperatura que tendría la misma persona en condiciones internas controladas, sin radiación ni viento. (Matzarakis y Mayer, 1999)

En este trabajo se revisan algunos indicadores típicos de confort y se presenta el uso de PET para diversas condiciones meteorológicas de Mendoza y una evaluación del confort urbano bajo diversas condiciones constructivas y de verde urbano.

METODOLOGÍA

Para el estudio del confort térmico existen varios índices, de los cuales muy pocos han sido aplicados con éxito en lugares abiertos o semiabiertos, debido a la multiplicidad de factores que lo afectan en dicho entorno. (Matzarakis y Mayer, 1999)

¹ Investigador Independiente CONICET

La Sociedad Alemana de Ingenieros en su directiva VDI 3787, parte 2 "Métodos para la evaluación biometeorológica del ser humano el clima y la calidad del aire para la planificación urbana y regional" y parte I: el clima "(VDI 1998), recomienda la aplicación de la PET (Physiological Equivalent Temperature) para la evaluación de la componente térmica de los diferentes climas. El PET se define como la temperatura del aire a la que el balance de energía humano, para unas condiciones dadas bajo techo, está equilibrado con unas mismas temperaturas de la piel y tasas de transpiración como las calculadas en condiciones a cielo abierto. Este índice presenta varias ventajas respecto de los otros, de las cuales por ejemplo podemos enumerar las siguientes: es termofisiológicamente importante y reproducible para cualquier lugar de estudio, y es fácil de entender por cualquier persona ya que su unidad de medición es en la escala Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Para el presente estudio se han tenido en cuenta datos de tres puntos geográficos diferentes distribuidos en el Gran Mendoza: (Figura 1)

- Estación Mendoza Aero (87418): Ubicada en el departamento de Las Heras, Latitud $32^{\circ}50'37.57''$ Sur y Longitud $68^{\circ}47'47.07''$ Oeste. (Un punto de medición)
- Observatorio Parque (87420): Ubicada en el parque General San Martín, departamento de Capital, Latitud $32^{\circ}53'39.95''$ Sur y Longitud $68^{\circ}52'21.32''$ Oeste. (Un punto de medición)
- Campus Universidad de Mendoza: Ubicada en el distrito de Benegas en el departamento de Godoy Cruz, Latitud $32^{\circ}57'6.84''$ Sur y Longitud $68^{\circ}51'5.41''$ Oeste. (Cinco puntos de medición)



Figura 1: Ubicación de los puntos de medición.

Cabe aclarar que para el presente estudio se procedió a un filtrado de los datos obtenidos, y así se separaron sólo los datos de los meses comprendidos desde diciembre a marzo, debido a que en estos meses se puede ver la incidencia del verde urbano en la evaluación del confort, por otro lado estos presentan homogeneidad de condiciones y a demás es donde se presenta el mayor estrés o sensación de disconfort debido a la radiación incidente. La radiación incidente es un parámetro muy importante a tener en cuenta ya que éste se puede modificar debido al efecto bóveda del arbolado urbano, el cual al ser de carácter caduco solo influye en la temporada estival.

Parámetros

Los factores que influyen en el Índice PET son:

- Nivel de Ropa: Se clasifica según su valor de aislamiento, ya que reduce la pérdida de calor del cuerpo. Su unidad estandarizada es el *clo* el cual se define como el aislamiento térmico ofrecido por la ropa por metro cuadrado de piel. ($1\text{ clo} = 0.155\text{ m}^2\text{C/W}$)
- Nivel Metabólico: El metabolismo es el motor del cuerpo, y la cantidad de energía producida por el metabolismo depende de la actividad muscular y de la superficie de piel, la cual disipa una parte de ella. Su unidad estandarizada es el *Met* correspondiente al nivel de actividad de una persona sedentaria, y equivale a una pérdida de calor de 58 W/m^2 de superficie corporal.
- Temperatura de Bulbo Seco: Debido a que éste indica la temperatura de una masa de aire en reposo.
- Velocidad del Aire: éste parámetro es de fundamental importancia debido a que su efecto influye en los procesos convectivos de equilibrio térmico en el cuerpo. (En días calurosos a mayor velocidad del aire se produce un mejor enfriamiento de la superficie de la piel debido a una rápida evaporación del sudor superficial.)
- Humedad: La tensión vapor influye en los procesos de evaporación del sudor, debido al vapor que el aire es capaz de aceptar. (En días de mucha humedad al encontrarse el aire saturado la velocidad de evaporación del sudor es más lenta, correspondido con el menor potencial del aire para recibir mayor vapor de agua y por lo tanto el enfriamiento del cuerpo es más lento)
- Época del año: Éste es un parámetro muy importante ya que según la época del año, es el índice de insolación recibido en la superficie. En la época estival (seleccionada) los rayos solares llegan de forma más perpendicular aumentando la insolación por cm^2 de superficie.
- Temperatura media Radiante (T_{mrt}): Éste ultimo factor, es en realidad el de mayor importancia en el cálculo del índice PET. Se define como la temperatura que traduce el efecto promedio de calentamiento de la radiación electromagnética de un entorno, debido a la complejidad para su medición en entornos abiertos, se utilizó un modelo el cual es capaz de calcularla, conjuntamente con el índice PET.

Modelo Rayman

Para el presente estudio se utilizó el Modelo Rayman desarrollado por el Instituto de Meteorología en la Universidad de Freiburg, Alemania. (Matzarakis y Mayer, 1999; Matzarakis et al., 1999)

Como el índice PET es un indicador termofisiológico, por lo tanto influyen las características corporales, peso, edad, etc. se debió tomar como referencia a un ser humano estándar. Debido a que se cuentan con estudios realizados en Europa se decidió normalizar a nuestro ser humano hipotético según parámetros europeos.

Ser humano de sexo masculino, 1,75 m de altura, 75 Kg. de peso. Con lo cual se deduce que su centro de gravedad al igual que su centro térmico se encuentra ubicado a 1,1 m de altura. Los valores de velocidad de viento normalizan para esa altura por medio de la siguiente ecuación que tiene en cuenta la rugosidad del terreno:

$$\frac{\hat{v}_z}{\hat{v}_1} = \left(\frac{z}{z_1} \right)^\alpha \quad (1)$$

Donde \hat{v}_1 es la velocidad medida por el anemómetro a 10 m de altura (Z_1), α es el exponente de velocidad media, establecida en 0,25 para áreas metropolitanas. (Chalfoun et al. 1991)

Los datos ingresados al programa Rayman fueron:

- Día
- Día del año (Juliano)
- Hora
- Temperatura de Bulbo Seco
- Humedad Relativa
- Velocidad del viento (m/s)
- Cobertura nubosa (octavos)

Como se mencionó anteriormente debido a la dificultad existente para la medición de la Tmrt, se utilizó una rutina específica del modelo Rayman para el cálculo de ésta variable. Para lo cual se deben ingresar datos adicionales:

- Factor de vista del cielo (Sky View Factor), éste parámetro es fundamental en el cálculo de la radiación directa. Para dicho cálculo se ingresó al programa una foto tipo ojo de pez en color, para la medición de cada factor de vista. (Figura 2). Rayman calcula el valor, un valor de 1 es equivalente a vista despejada sin obstáculos que interfieran en la radiación directa.

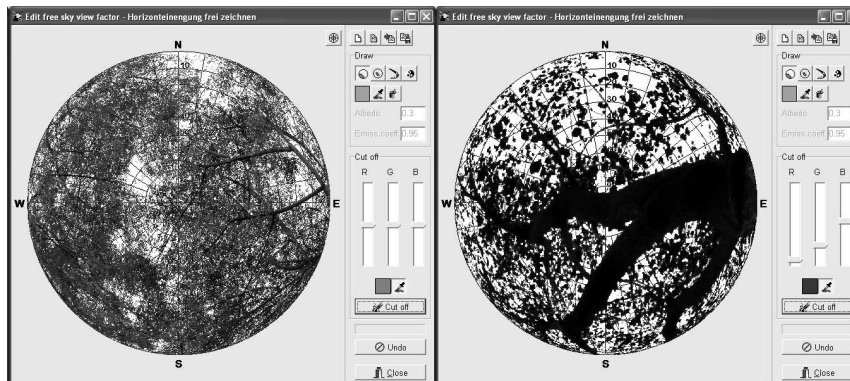


Figura 2: Sky View Factor. Izquierda a) Parque Sombra, SVF = 0,236. Derecha b) Prunus 2,5 m, SVF = 0,311.

- Topografía, se ingresaron datos de topografía en un formato de archivo de texto. Mapa engrillado de 400 celdas, de 100x100m. Para cada lugar de medición. (Fig. 3)

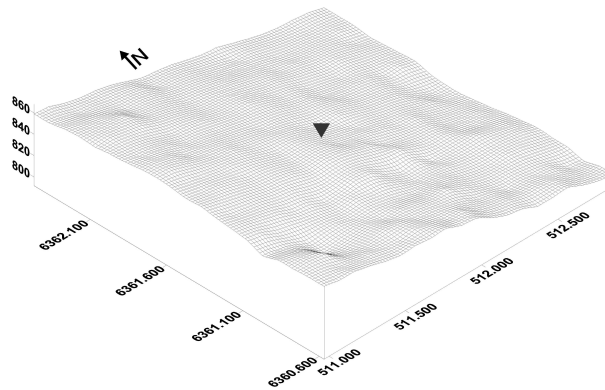


Figura 3: Topografía. Se coloca como ejemplo la rugosidad de superficie de las mediciones hechas en el observatorio Parque.

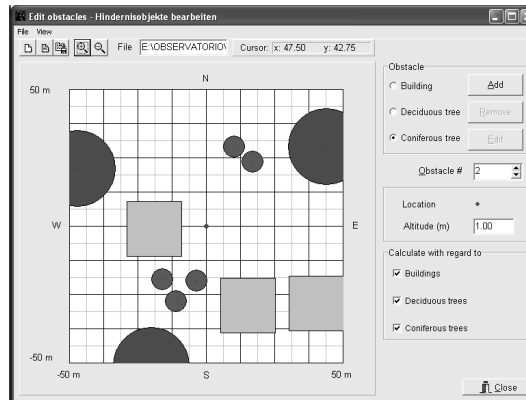


Figura 4: Obstáculos. Se presentan de tres clases. Cuadrados gris claro: edificaciones; círculos mayores gris claro: árboles caducos; círculos menores oscuros coníferas.

- j) Albedo, se incorporaron de acuerdo al tipo de entorno en donde se ubicó el instrumental. Pasto y Parque = 0,26, Cemento = 0,55 y secano (aero) = 0,45.

El PET indica la percepción térmica del cuerpo, como se enunciara arriba, y a demás de él se determina el grado de estrés fisiológico al que se encuentra sometido. Tabla 1. (Matzarakis y Mayer, 1997; Jendritzky et al. 1990; Mayer y Matzarakis, 1997)

PET	Percepción Térmica	Grado de Estrés Fisiológico
≥ 4	Muy Frío	Estrés por Frío Extremo
4-8	Frío	Estrés por Frío Fuerte
8-13	Fresco	Estrés por Frío Moderado
13-18	Poco Frío	Estrés por Frío Suave
18-23	Confortable	Sin Estrés Térmico

Tabla 1: Resumen de las temperaturas interiores para todos los esquemas con aislación de muros

A demás como el PET es un índice termofisiológico como se expusiera al inicio. Se deben indicar valores respecto del ser humano hipotético ubicado en el centro de medición. Y del tipo de ropa y actividad.

- Altura; 1,75 m
- Peso; 75 Kg
- Edad; 35 años
- Sexo; Masculino
- Ropa; 0,5 clo (En verano) (Tabla 2)
- Actividad; 58 W (sentado) (Tabla 3)

	Ligero	Medio	Pesado
Capa Inferior			
Ropa interior	0,05	0,08	0,2
Calzado			
Zapatos y medias	0,04	0,05	0,16
Sandalias o Chancletas	0,02	0,02	0,02
Capa Media			
Camisa de manga corta	0,17	0,18	0,19
Camisa de manga larga	0,25	0,29	0,34
Pantalones	0,15	0,19	0,24
Bermudas	0,08	0,08	0,08
Capas exteriores			
Chaqueta	0,25	0,3	0,36
Camiseta	0,13	0,18	0,22

Tabla 2: Ropa de Hombres (clo). Ref. [5]

Actividad	W/m ²	Met
Acostado	46	0,8
Sentado Relajado	58	1,0
De pié, relajado	70	1,2
De pié, lavando platos	145	2,5
Trabajo doméstico: Barriendo	170	2,9
Caminando horizontal 4 km/h	175,2	2,96
Deporte: corriendo a 15 Km/h	550	9,5

Tabla 3: Actividad.

A continuación se presentan los gráficos correspondientes a la variación de Temperatura (Figura 5) y Humedad (Figura 6), por ser los más representativos, como valor de entrada, obtenidos en cada punto de medición.

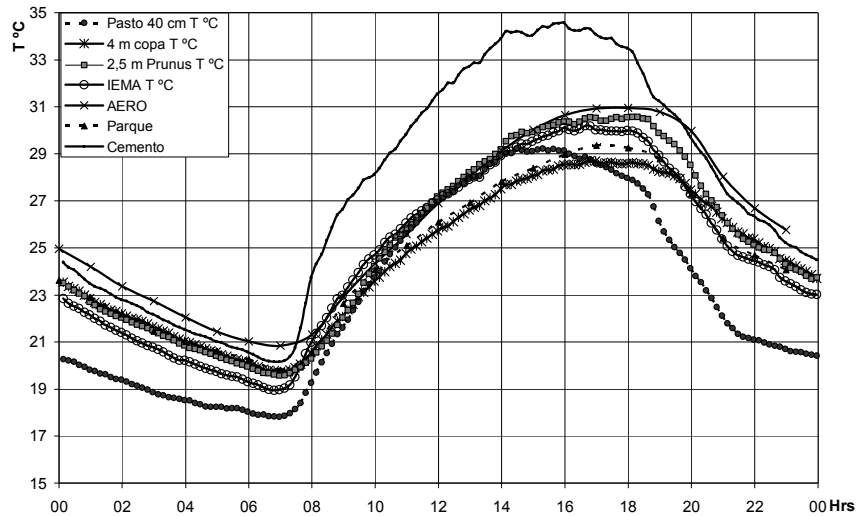


Figura 5: Temperatura para cada punto de medición.

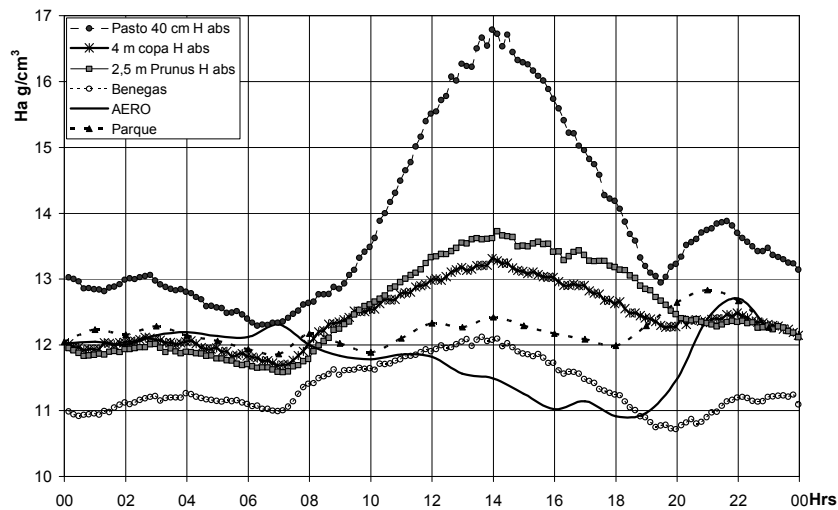


Figura 6: Humedad para cada punto de medición.

RESULTADOS

Variación de la Tmrt según el tipo de superficie.

Por medio del modelo se determinó la Tmrt (temperatura media radiante incidente). (Figura 7), Se puede ver que éste factor presenta una fuerte componente para una superficie hormigonada superando el valor de 60° C promedio aproximadamente a las 14 hrs. Mientras que para una persona que se encuentra en una sombra del parque la Tmrt para la misma hora no llega a los 44°C. De aquí se puede deducir la importancia de superficies verdes con arboledas frondosas. Ya que estas actúan de forma dominante en la absorción de radiación directa y por lo tanto en la disminución de la Tmrt.

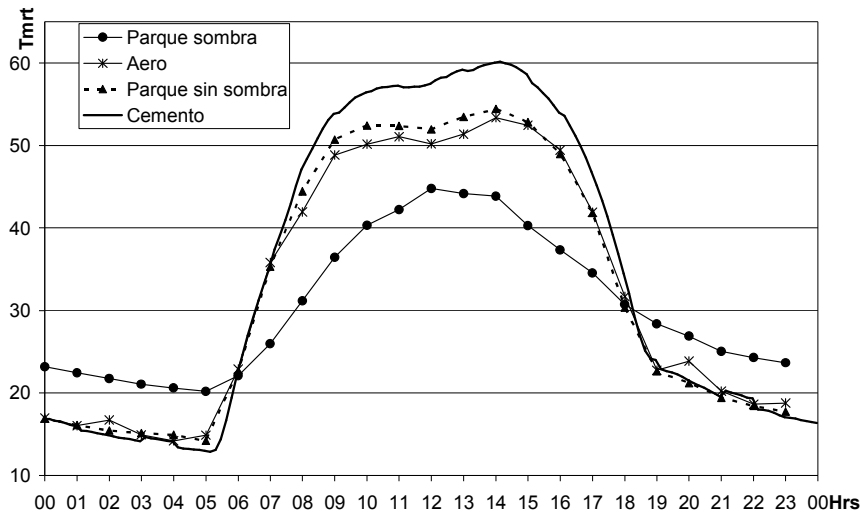


Figura 7: Tmrt para cada tipo de superficie.

Variación PET según el tipo de superficie.

Con el fin de mostrar el índice de confort según el tipo de superficie en donde se ubica un ser humano hipotético se muestra en la figura 8 el grado de estrés al que se encuentra sometido. En el gráfico se ve claramente las diferencias de confort debidas a zonas de incidencia directa de la radiación por falta de obstáculos y zonas con especies arbóreas, como en el caso parque sombra y parque (sol) donde se mantiene en los horarios de mayor temperatura diferencias de entre 6°C y 8°C.

Logrando así que el ser humano presente un estrés térmico moderado sin llegar a un fuerte estrés fisiológico debido a la temperatura. A demás se puede apreciar que un ser humano sentado en una superficie hormigonada a las 14 hrs. experimenta en promedio una temperatura de 47,85°C mientras que en el secano, aeropuerto 35°C, luego en el parque al sol 38,5°C mientras que la condición más favorable es para el parque en la sombra de especies arbóreas con una temperatura aproximada de 33°C. Estas diferencias de casi 15°C entre zona hormigonada al sol y zona forestada a la sombra de un árbol, nos muestra la importancia de nuestro arbolado urbano y su rol en el control de la temperatura en nuestra ciudad como un factor de fundamental importancia. A demás se aprecia que no solo para mejorar el confort urbano es necesaria la forestación, sino la selección de forestales que provean de una abundante sombra, disminuyendo así la radiación directa, ya que por ejemplo el pasto presenta en plena insolación una percepción térmica no muy alejada de la que presenta el cemento. (Correa et al., 2006)

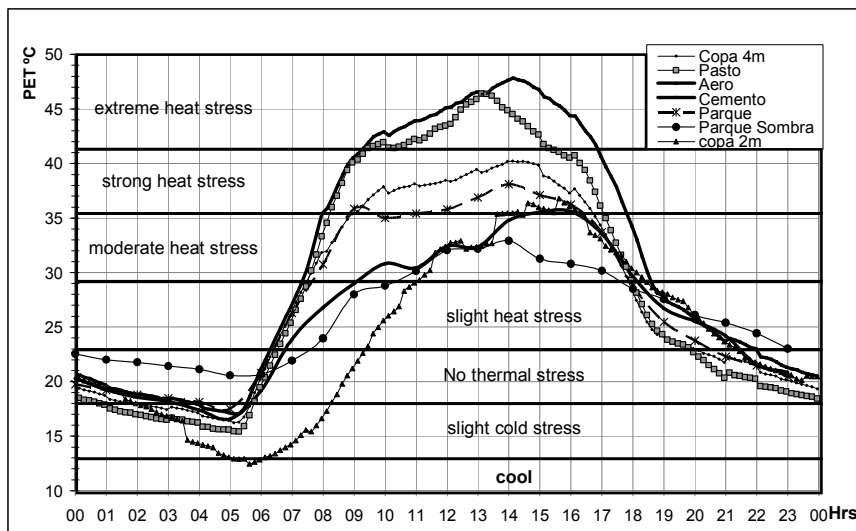


Figura 8: Variación del PET para diferentes tipos de superficies y lugares. Los datos de Copa, Pasto y Cemento se corresponden a las mediciones hechas en Benegas.

Por último se presenta un análisis donde se estudia la influencia del índice PET para un ser humano caminando a 4 km/h en un plano horizontal, $175,2 \text{ W/m}^2$ de tasa metabólica, en la misma dirección del viento pero en sentido contrario a él. Por lo tanto el viento total incidente es la suma de las condiciones reinantes de viento más el producido por el movimiento del ser humano. Puede notarse que una persona caminando en la sombra versus una persona sentada en el mismo lugar, experimenta en promedio una disminución de 2,5 a 3°C atribuidos al efecto del viento. Por otro lado una persona caminando al sol versus una persona sentada en el mismo lugar experimenta en promedio una disminución de 6,5 a 8°C . Con lo cual se pone de manifiesto la incidencia en el confort debido a la componente del viento. Éste mejora la sensación de confort en una forma mayormente marcada en zonas de radiación directa, o pleno sol.

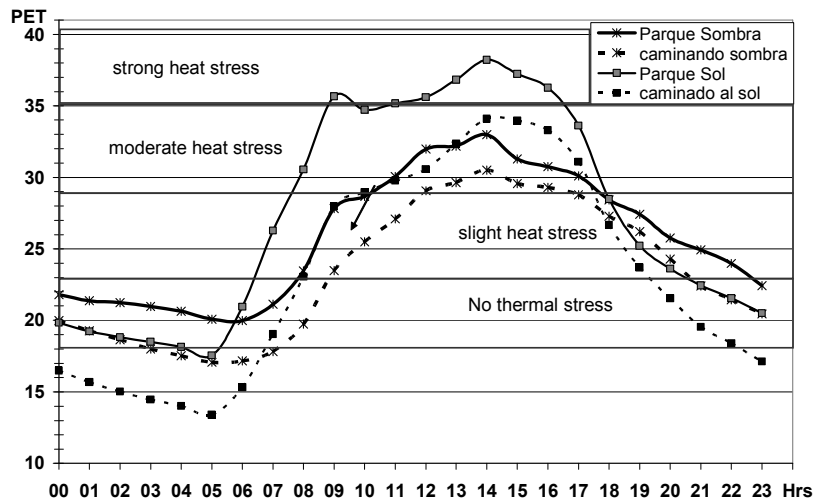


Figura 9: Compara PET según actividad.

CONCLUSIONES

Este estudio muestra la necesidad de preservar y mejorar las zonas vegetadas en nuestra ciudad bosque. Para así, de esta forma disminuir la radiación incidente y mejorar los valores de albedo. Por otro lado en épocas estivales es mejor una disminución de radiación mientras que en épocas invernales se prefiere lo contrario, de allí la importancia de contar con un arbolado urbano caduco. Ya que este provee sombras en verano disminuyendo la radiación, y en invierno al perder el follaje permite el ingreso de radiación, de esta forma mejora las sensaciones de confort en todas las épocas del año. A demás las zonas vegetadas mejoran los valores de humedad ayudando a mejorar las sensaciones de confort en nuestra ciudad ubicada en el secano. No deben de olvidarse los beneficios asociados a la calidad del aire, la amortiguación de sonidos y una mejora en la estética de la ciudad.

REFERENCIAS

- Bochaca, Fabián R, Puliafito S. E., (2007) "Dry island effect on intermediate city, the case of the city of Mendoza" en *Urbanization, Global Environmental Change, and Sustainable Development in Latin America*. Eds. Roberto Sanchez Rodriguez, Adriana Bonilla, Digital Graff Press, IAI, Sao José dos Campos Brazil, ISBN 978-85-99875-02-5, pp 77-104.
- Bochaca Fabián, Puliafito Enrique, Allende, David (Noviembre 2008); "Modelación del verde urbano en la ciudad de Mendoza y su relación con las variaciones de temperatura y humedad", *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 11-14 Mendoza, Vol. 2008, pp. 01.119-01.126. ISSN 0329-5184.A.
- Matzarakis and H. Mayer. Atmospheric conditions and human thermal comfort in urban areas.11th Seminar on Environmental Protection "Environment and Health" (1999). 20.-23. November 2000, Thessaloniki, Greece, 155-166.
- Andreas Matzarakis, Helmut Mayer, Moses G. Iziomon. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *Int J Biometeorol* 43:76-84
- Jennifer Spagnolo, Richard de Dear. (2003). A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. *Building and Environment* 38 721 – 738
- Chalfoun NV, Yoklic MR, Thompson RD, (1991). Using the MRT, An Original Computer Model in Assessing Outdoor Thermal Comfort Strategies for the Arizona Solar Oasis Project, presented at The First International Design for Extreme Environments Assembly, IDEEA ONE, University of Houston, Houston, Texas, USA.
- Matzarakis A, Mayer H, (1997). Heat stress in Greece. *Int J Biometeorol* 41:34-39
- Jendritzky G, Menz H, Schirmer H, Schmidt-Kessen , (1990). W. Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes)
- Mayer H, Matzarakis A., (1997). The urban heat island seen from the angle of human-biometeorology. In: *Proceedings of the International Symposium on Monitoring and Management of the Urban Heat Island*, Fujisawa, pp 84-95
- E. Correa, C. Martínez, G. Lesino, C. de Rosa, A. Cantón. (September 2006). Impact of Urban Parks on the Climatic Pattern of Mendoza's Metropolitan Area, in Argentina. *PLEA 2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Geneva, Switzerland, 6-8

ABSTRACT

Urban climatology has been devoted to study the energy balances of the city to establish the relationship of temperature and humidity in their environment. Due to the strong interaction between man and the built environment the city can change the established heat balance. This paper studies the biometeorological comfort in the city of Mendoza under various constructive conditions and urban green spaces. These conditions were analyzed using meteorological data of simultaneous measurements between different points for a two years period. One of the most widely used bioclimatic indicators is currently the Physiological Equivalent Temperature (PET). We report the use of PET which shows differences up to 15 °C between areas under the crown of tree species and paved areas. The conclusion reinforces the need to select and preserve urban tree species due to its role in reducing the direct radiation and in improving the urban thermal comfort.

Keywords: Bioclimatology, Physiological Equivalent Temperature, comfort, urban green.