

INFLUENCIA DE ESQUEMAS URBANO-FORESTALES SOBRE EL CONSUMO ENERGÉTICO RESIDENCIAL EN UNA “CIUDAD OASIS” DE ZONA ÁRIDA.

M. A. Ruiz¹, E. N. Correa²

Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda - Instituto Ciencias Humanas Sociales y Ambientales (LAHV-INCIHUSA) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Centro Científico y Tecnológico – CCT-Mendoza – C.P. 5500 – Mendoza
Tel. 0261-45244310 – e-mail: aruiz@mendoza-conicet.gob.ar

Recibido 09/09/15, aceptado 13/10/15

RESUMEN: En la ciudad de Mendoza la forestación ha sido usada para controlar la intensa radiación solar característica y mejorar la habitabilidad de los espacios. Sin embargo, la isla de calor urbana es de 6°C en promedio con consecuencias energético-ambientales que enfatizan la necesidad de replantear el modo de forestar la ciudad. El fin último es detectar los esquemas más eficientes a fin de disminuir el consumo de energía residencial y generar propuestas técnicas factibles de incorporar en códigos urbanos. Para ello, se monitorearon 9 canales viales representativos en invierno y verano. Se simuló con SIMEDIF el comportamiento térmico de un prototipo de vivienda inserta en cada uno de estos canales a fin de estimar su consumo de energía. Los resultados indican que los esquemas urbanos que confluyen en una baja radiación solar y una mejor circulación del viento son los que minimizan los consumos de energía auxiliar.

Palabras clave: consumo energético residencial; canales viales urbanos forestados; ciudad oasis; zona árida.

INTRODUCCION

Las ciudades tienen una acción transformadora del espacio natural en donde se asientan alterando en mayor o menor medida los parámetros de sus climas locales. Uno de los principales cambios que causa la ciudad sobre el clima es el incremento de la temperatura del aire y el desarrollo de una isla de calor, que se traduce en una mayor temperatura del centro urbano en relación con el espacio rural circundante (Oke, 1973; Cui y Shi, 2012). Este fenómeno afecta el consumo residencial de energía, la calidad del aire y el grado de ocupación de los espacios abiertos, entre otros.

En este sentido, la influencia del clima sobre el consumo de energía, en particular la demanda de combustibles fósiles, se ha abordado en diversos estudios (Santamouris et al., 2001; Pérez-Lombard et al., 2008). Para las urbes de más de 100.000 habitantes, el consumo de energía durante las horas pico se eleva entre 1,5 y 2,0% por cada grado de aumento de la temperatura de la ciudad (Akbari et al., 1992). Particularmente en la Argentina, la demanda residencial de energía eléctrica representa más del 40% de la demanda total del distribuidor y el consumo aumenta de manera sostenida desde el año 2002. Paralelamente, la instalación de equipos de aire acondicionado en el país ha crecido 100% en el periodo 2005-2009 (INDEC, 2012).

En particular, en el Área Metropolitana de Mendoza (AMM), ciudad oasis de zona árida, el fenómeno de isla de calor urbana se verifica en todas las estaciones del año, siendo que la ocurrencia de las máximas temperaturas se da generalmente durante el periodo de enfriamiento nocturno. Las intensidades máximas de isla de calor oscilan entre los 8 y los 10°C (Correa, 2006).

¹ Investigadora Asistente CONICET

² Investigadora Adjunta CONICET

En las ciudades de zonas áridas que siguen el esquema de ciudad oasis, la morfología de la vegetación es un componente clave en el funcionamiento energético de los espacios abiertos. La influencia de las zonas verdes urbanas en la disminución de la isla de calor ha sido ampliamente demostrada en la literatura internacional. Autores como Robinette (1972); Thorsson et al. (2004); Morakinyo et al. (2013), entre otros, reconocen el papel de los árboles, la vegetación y el agua alrededor de los edificios en la determinación de las condiciones térmicas de los mismos. De ello se desprende que es necesario analizar con profundidad el impacto de la combinación de distintas estructuras forestales, edilicias y urbanas para la concreción de la sustentabilidad urbana en lo referente a la habitabilidad del espacio abierto y el consumo de energía de los espacios construidos.

Por lo tanto, este trabajo presenta parte de los resultados de la tesis doctoral de Ruiz (2013). Se busca analizar el nivel de consumo energético residencial asociado a distintos esquemas de canales urbanos forestados. El objetivo final es seleccionar las alternativas morfológicas óptimas en los aspectos energéticos y ambientales de los espacios abiertos en ciudades oasis de clima árido.

METODOLOGÍA

Con el fin de estudiar el impacto de la vegetación urbana sobre el consumo energético residencial, se ha monitoreado la situación microclimática de nueve canales viales urbanos durante los veranos 2009 y 2010 y el invierno 2010. A continuación se detalla: (a) la selección de los casos de estudio; (b) la descripción del prototipo de vivienda; (c) la simulación del comportamiento térmico interior del prototipo de vivienda y (d) el método de monitoreo y recopilación de datos.

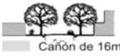
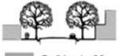
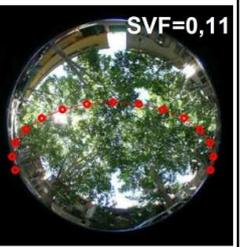
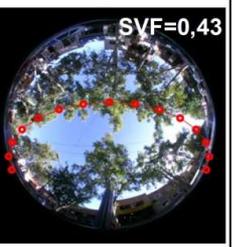
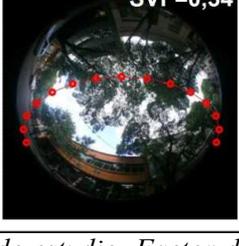
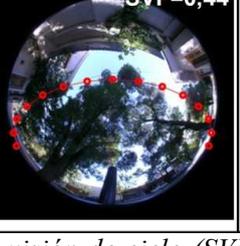
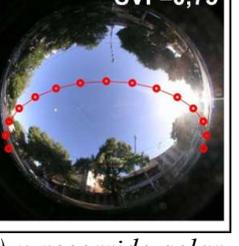
		16 m	20 m	30 m
ANCHO DE CANAL VIAL		 Cañón de 16m	 Cañón de 20m	 Cañón de 30m
ESPECIE FORESTAL	<i>Platanus hispanica</i>	 SVF=0,31	 SVF=0,11	 SVF=0,43
	<i>Morus alba</i>	 SVF=0,55	 SVF=0,46	 SVF=0,62
	<i>Fraxinus excelsior</i>	 SVF=0,34	 SVF=0,44	 SVF=0,75

Figura 1: Los nueve casos de estudio. Factor de visión de cielo (SVF) y recorrido solar durante los días estudiados.

Selección de los casos de estudio

Este estudio ha sido llevado a cabo en el Área Metropolitana de Mendoza, ciudad inserta en una zona de clima árido (Kottek et al., 2006). Esta ciudad responde al modelo urbano abierto, es decir que presenta una trama urbana con calles anchas y construcciones relativamente bajas, donde la

construcción de la sombra se basa en una intensa forestación dispuesta en paralelo a las calles. El desarrollo de la trama forestal ha permitido túneles “verdes” que dan la característica de un auténtico bosque dentro de la ciudad. Estas cualidades han sido reconocidas a nivel local e internacional motivo por el cual se ha calificado a la ciudad como “ciudad oasis” (Bórmida, 1984; McPherson, 1988).

Este estudio evalúa el impacto de distintas morfologías del entorno urbano forestado de baja densidad edilicia sobre los consumos energéticos de viviendas ubicadas en Área Metropolitana de Mendoza. Se consideraron los casos resultantes de la combinación de los tres anchos de canal vial predominantes (16, 20 y 30 m) y las tres especies forestales representativas (plátano, morera y fresno). Todos los canales viales evaluados poseen orientación Este-Oeste, por ser ésta la situación más restrictiva respecto a la radiación solar. Para un mayor detalle de las características de la ciudad que fundamentan esta selección, ver Correa et al. (2012). En la Figura 1 se presentan fotografías hemisféricas de los nueve casos de estudio y sus factores de visión de cielo (SVF, por sus siglas en inglés).

Descripción del prototipo de vivienda

Con el fin de determinar la influencia de la vegetación en los consumos de energía residenciales se ha elegido un prototipo de vivienda unifamiliar que es insertado por medio de simulación en cada uno de los nueve casos evaluados. Se ha elegido una vivienda unifamiliar ya que el parque edilicio actual en el Área Metropolitana de Mendoza está constituido en su mayor parte por este tipo de edificaciones. En cuanto a la tipología seleccionada, se trata de la Casa o Chalet Neo-Colonial que se encuentra con frecuencia en vastos sectores de baja densidad edilicia del AMM (Ganem, 2006). Esta tipología de chalet tiene la característica de ser compacta y su relación con el corazón de manzana es bastante pobre. Sin embargo, incorpora elementos tales como galerías, porches y atrios. En general, estos componentes son considerados sólo como decorativos, a pesar de tener el potencial uso como parte fundamental de la envolvente para la regulación climática.

La Figura 2 muestra la vivienda, con una superficie cubierta de 106 m² y un volumen de 298,75 m³. La envolvente vertical, del tipo macizo, es de ladrillón revocado en ambas caras de 0,20 m de espesor (sin aislación). La cubierta, de tipo liviano, es inclinada, a dos aguas conformada por las siguientes capas: correas de madera y machimbre, aislación térmica (lana de vidrio) y teja cerámica tipo colonial. En el espacio interior, la vivienda presenta cielorrasos suspendidos de yeso conformando una cámara de aire estanco que actúa de fuelle entre el exterior y el interior. El prototipo de vivienda consta de 8 locales o habitaciones, entre los cuales el Local 5 presenta la mayor vulnerabilidad respecto de las condiciones externas ya que es el único ambiente con ganancia solar directa al Norte. Además, este local funciona como estar-comedor, habitación que interesa especialmente por su intenso uso familiar. Por estas razones se ha decidido enfocar el estudio energético sobre este local. El área colectora total corresponde sólo a un 6% de la envolvente.



Figura 2: Planta y vista de la vivienda desde el Norte. Adaptado de Ganem (2006).

Simulación del comportamiento térmico interior del prototipo de vivienda

Con el propósito de simular la temperatura interna de la vivienda ubicada en cada canal vial urbano (CVU), se utilizó el programa SIMEDIF para Windows. Este software ha sido desarrollado en el INENCO (Instituto de Investigación en Energía No Convencional) como una herramienta de diseño y simulación del comportamiento térmico transitorio de edificios con acondicionamiento natural,

ganancias internas variables, enfriadores evaporativos e intercambiadores de calor aire-tierra (Flores Larsen y Lesino, 2000). SIMEDIF ha sido empleado por numerosos grupos de investigación para la simulación de datos medidos con muy buenos resultados, mostrando la potencialidad del programa (Hernandez y Lesino, 2000; Filippin y Flores Larsen, 2006; Flores Larsen et al., 2004).

El programa SIMEDIF para Windows admite hasta 50 zonas térmicas. Para describir un edificio se lo subdivide en locales (zonas que pueden considerarse isotermas). Esta única temperatura evoluciona en el tiempo según lo determinado por el programa, conociendo los datos constructivos y de emplazamiento espacial y temporal del edificio, la variación de temperatura externa en el período a considerar y la radiación solar. Los locales están térmicamente conectados entre sí y con el exterior a través de paredes, tabiques o ventanas. El modelo admite el ingreso hora a hora de las ganancias internas (disipación metabólica, cocción de alimentos, calefacción auxiliar etc.), aspecto altamente favorable para simular edificios en condiciones reales de uso. El método de cálculo consiste en un esquema de diferencias finitas explícito avanzando a intervalos de tiempo Δt , donde Δt es un submúltiplo de una hora. Las temperaturas incógnitas en el problema son las temperaturas de los locales y las temperaturas de los nodos que el esquema en diferencias finitas define en cada elemento con masa (Flores Larsen y Lesino, 2000).

Ganem (2006) ha validado el modelo del prototipo de vivienda en SIMEDIF mediante el ajuste de la simulación con datos experimentales. Por lo tanto, es posible realizar cambios en las condiciones climáticas de sus alrededores, a fin de analizar en forma confiable el impacto sobre la temperatura interior y la demanda de energía auxiliar. En este sentido, el coeficiente de determinación R^2 entre las mediciones y la simulación resultante es del 81 %, que significa que sólo un 19 % de la variabilidad de los datos no es explicado por el modelo de simulación en SIMEDIF.

Método de monitoreo y recopilación de datos

En cada uno de los canales analizados, desde mediados de diciembre de 2009 hasta febrero de 2010, se instalaron nueve estaciones fijas de medición automática. Las estaciones instaladas son del tipo H08-003-02 y miden temperatura y humedad cada 15 minutos. Los sensores se colocaron a mitad de cuadra, a una altura de 2,5 m de la calle, dentro de cajas blancas de PVC perforado, para evitar la irradiación y asegurar la circulación adecuada de aire (Oke, 2004). La Tabla 1 muestra las temperaturas exteriores medias, máximas y mínimas en cada caso de estudio durante el periodo evaluado, tanto en verano como en invierno. Del total de días monitoreados, en la estación de verano se tomaron dieciocho días de medición: desde el 7 al 24 de enero de 2010. Para el estudio de los resultados se seleccionaron cinco días: desde el 16 al 20. Para la situación de invierno, se tomaron veinte días completos, desde el 22 de julio al 10 de agosto de 2010. Para el análisis se selecciona un período comprendido entre el 28 de julio y el 1° de agosto.

ESPECIE FORESTAL	ANCHO DEL CANAL VIAL	DENOMINACIÓN	INVIERNO			VERANO		
			Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima
	16 m	16P	0,51	7,44	15,81	17,14	27,55	37,88
<i>Platanus hispanica</i>	20 m	20P	-0,95	6,84	16,38	16,10	26,84	36,68
	30 m	30P	-0,95	7,18	16,29	16,19	27,88	39,22
	16 m	16M	-0,72	7,00	16,95	17,14	28,42	41,64
<i>Morus alba</i>	20 m	20M	-0,27	6,93	16,57	17,14	27,87	37,33
	30 m	30M	-0,39	7,41	17,05	16,86	27,91	37,44
	16 m	16F	0,51	7,81	15,81	17,05	27,83	36,89
<i>Fraxinus excelsior</i>	20 m	20F	-0,05	7,72	17,62	16,67	28,04	41,17
	30 m	30F	-0,27	7,33	16,48	16,10	28,14	41,76

Tabla 1: Temperaturas exteriores mínimas, medias y máximas en cada CVU, en invierno y verano.

La radiación global horizontal fue tomada de la Estación Meteorológica Pegasus del Centro Científico Tecnológico CCT-Mendoza – CONICET. Para el desarrollo de las simulaciones, el software necesita los datos meteorológicos externos de temperatura y radiación horarias. Los datos de temperatura se

obtuvieron a partir del promedio horario de los datos de las estaciones fijas de monitoreo localizadas en cada uno de los casos analizados.

El período de simulación de verano estuvo comprendido entre el 16 y el 20 de enero de 2010 caracterizado por días claros. Con el fin de alcanzar las condiciones iniciales para el período de monitoreo se simularon 10 días previos. Para la situación de invierno, se corrieron un total de 20 días, desde el 22 de julio al 10 de agosto de 2010. Para el análisis se seleccionó el período comprendido entre el 28 de julio y el 1° de agosto, dado que presentaron condiciones de cielo claro. Los días previos se utilizaron para alcanzar las condiciones iniciales. El programa requiere que se ingrese una primera temperatura para comenzar el cálculo, denominada “temperatura inicial de cálculo”. Se ha utilizado la temperatura media diaria de cada periodo, es decir del mes de enero y del mes de julio.

La influencia diferencial de la radiación en cada CVU se simuló mediante el ingreso de distintas áreas de radiación. El área de las paredes que dan al cañón vial fue afectada por el SVF de cada canal vial. Las superficies de los techos que dan al Norte también han sido modificadas por el SVF en función de la profundidad de la vivienda. En el caso de los techos que dan al Este, se ha realizado el mismo procedimiento con la salvedad de que sólo están sombreados durante las horas de la mañana, por lo cual el área sólo ha sido reducida en el 50%. En cuanto a las paredes que lindan con otras edificaciones se considera a las mismas como parte de un proceso adiabático debido a que por la situación sísmica de Mendoza no se comparte medianera si no que cada vivienda tiene su pared de 0,2 m de espesor y 5 cm de aislante (poliestireno expandido, generalmente) en el medio.

Las ganancias internas se han considerado constantes para todos los casos analizados. Se han incluido las ganancias internas por local y por hora según precisa el software SIMEDIF. Se ha tomado en cuenta la disipación metabólica, la cocción de alimentos, la producción de agua caliente y el aporte de aplicaciones eléctricas e iluminación.

Para la vivienda estudiada, las propiedades físicas de los materiales utilizados se obtuvieron a partir de tablas (Incropera y DeWitt, 1996). Según encuestas que se desarrollaron en un conjunto de 20 viviendas tipo Chalet Neo-Colonial (Ganem, 2006), no se realiza ventilación motivo por el cual se adoptaron valores de renovaciones de aire entre 0,5 y 1 según el local. Para las ventanas, se utilizó un valor de transmitancia térmica de $6 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (día y noche). Todos los cerramientos se consideraron como muros de ladrillo de la zona, con un coeficiente de conducción de $0,72 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, una densidad de 1797 kg/m^3 y una capacidad calorífica de $919 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Para los techos se consideró un coeficiente de $0,5 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

En cuanto a las variables geométricas y termofísicas, se ha realizado la división del edificio en 8 locales según el plano del Figura 2. Las conexiones entre locales se han modelado como paredes y puertas. Además, se toman como conexiones al exterior las ventanas, los techos (simulados como tabiques sin acumulación de calor) y los pisos que se han tomado como paredes según lo explicitado en el Manual de Uso del programa (Flores Larsen et al., 2000).

En cuanto a los coeficientes convectivos que se aplican sobre paredes y tabiques, es necesario especificar según el tipo de elemento. Para superficies exteriores, el coeficiente global convectivo-radiativo se ha calculado a partir de la relación Duffie y Beckman (1991) que se presenta en la Ecuación 1, donde v es la velocidad del aire en m/s.

$$h = 5,7 + 3,8 \cdot v \quad (1)$$

En este estudio se han tomado los datos de v provenientes de las campañas de medición con estaciones móviles durante enero 2009 y 2010 y se han relacionado con los de la estación Pegasus. Para los datos del invierno se ha buscado la misma proporción respecto de los datos observados en la estación Pegasus. Para las paredes y tabiques internos, los coeficientes de transferencia por convección de este estudio se han tomado los valores de $6 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para aquellas superficies internas que no reciben radiación solar y $8 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para aquellas paredes y tabiques internos que reciben radiación solar. Para el lado del piso en contacto con el suelo se toma el valor de $0,1 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (en realidad, este valor

debería ser nulo, pero el programa entrega un mensaje de error si se coloca $0 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ como coeficiente de transferencia por convección).

A partir de la información y la selección de los parámetros discutidos previamente, se procedió con las simulaciones a fin de obtener las temperaturas interiores de la vivienda analizada, inserta en cada uno de los canales viales evaluados. De este modo fue posible conocer la influencia del ambiente exterior sobre el comportamiento térmico de la misma.

Posteriormente se establecieron temperaturas de confort para cada estación y se calculó la energía auxiliar necesaria para mantener la temperatura interior de la vivienda en situación de confort, es decir la energía utilizada para calefacción en invierno o para refrigeración en verano. Según Givoni (1998), los límites de la zona de confort en climas cuya humedad atmosférica absoluta es media o baja resultan independientes del contenido de humedad, ya que el confort de las personas en estado sedentario y con ropa común no se ve afectado por esta variable. Cuando la humedad atmosférica absoluta es alta los efectos de la temperatura y la humedad están interrelacionados y el límite superior de temperatura disminuye a medida que aumenta la humedad.

Los límites de temperatura de confort sugeridos cuando el aire está quieto son de 18 a 25°C en invierno y de 20 a 27°C en verano. Este límite de temperatura superior es aplicable a bajos niveles de humedad (por debajo de un contenido de vapor de 12 g/kg). A humedades más altas el límite superior de temperatura disminuye progresivamente. Para las personas que viven en países en vías de desarrollo de clima cálido el autor sugiere elevaciones de aproximadamente 2°C en los límites de temperatura, teniendo en cuenta la aclimatación como resultado de vivir en edificios sin aire acondicionado en un clima caliente. En invierno, las bajas temperaturas y la situación energética local determinan que los límites de confort no se modifiquen, de manera que los mismos se encuentran entre 18 y 25°C . En la ciudad de Mendoza, durante el verano, las condiciones de humedad absoluta habitualmente se sitúan por debajo de los 12 g/kg . El uso del aire acondicionado no es generalizado, y en particular, la vivienda que se analiza no cuenta con esta tecnología. Sin embargo, el AMM presenta una estación fría y una cálida, bien diferenciadas, con estaciones intermedias de otoño y primavera. Por lo tanto, sólo se aumenta en 2°C el límite inferior del rango de confort en el interior de la vivienda para la situación de verano y el rango de confort se define entre los 22 y los 27°C para la estación estival.

RESULTADOS

Temperatura interior de la vivienda

Se consignan aquí los resultados obtenidos en el espacio seleccionado (Local 5), que funciona como estar-comedor, para el invierno (Figura 3) y para el verano (Figura 4). En líneas generales, se puede decir que tanto en invierno como en verano las viviendas más frescas son las ubicadas en los cañones viales forestados con *Platanus hispanica*. Esto se debe principalmente a las bajas temperaturas exteriores registradas en esos canales y a la escasa radiación solar recibida resultado del bajo factor de visión de cielo de estos cañones urbanos (ver Figura 1 y Tabla 1). Asimismo, se constata que las temperaturas interiores son menos influenciadas por el entorno en invierno que en verano debido a que los forestales evaluados son caducifolios, es decir que no cuentan con hojas que cumplan la función de protección solar durante el invierno, por lo cual las especies se parecen entre sí.

El caso del plátano es particular ya que se trata de una especie caducifolia pues entra en reposo con las bajas temperaturas del invierno. Sin embargo, esta especie presenta una particularidad: las hojas muertas quedan sobre el árbol protegiendo las yemas de las nuevas hojas que brotarán en la primavera. Esta característica se denomina como marcescente. Por lo tanto, el SVF no se modifica sustancialmente entre el verano y el invierno, a pesar de que esas hojas no cumplan las funciones de fotosíntesis, respiración ni transpiración.

Temperaturas interiores invernales. Cuando se analizan los canales viales de 16 m de ancho, se observa que durante la madrugada y hasta las $8:00 \text{ hs}$ (horario solar) las viviendas ubicadas en el canal forestado con plátanos y en el forestado con moreras muestran similares temperaturas. Sin embargo, durante el resto del día, la temperatura del prototipo edilicio inserto en un canal vial urbano forestado

con moreras escala hasta asemejarse a la del CVU forestado con fresnos (Figura 3a). Este comportamiento puede deberse a que el canal con *Morus alba* presenta un hueco en el extremo Oeste, debido a lo cual la radiación solar accede en mayor medida que si tuviese un desarrollo homogéneo.

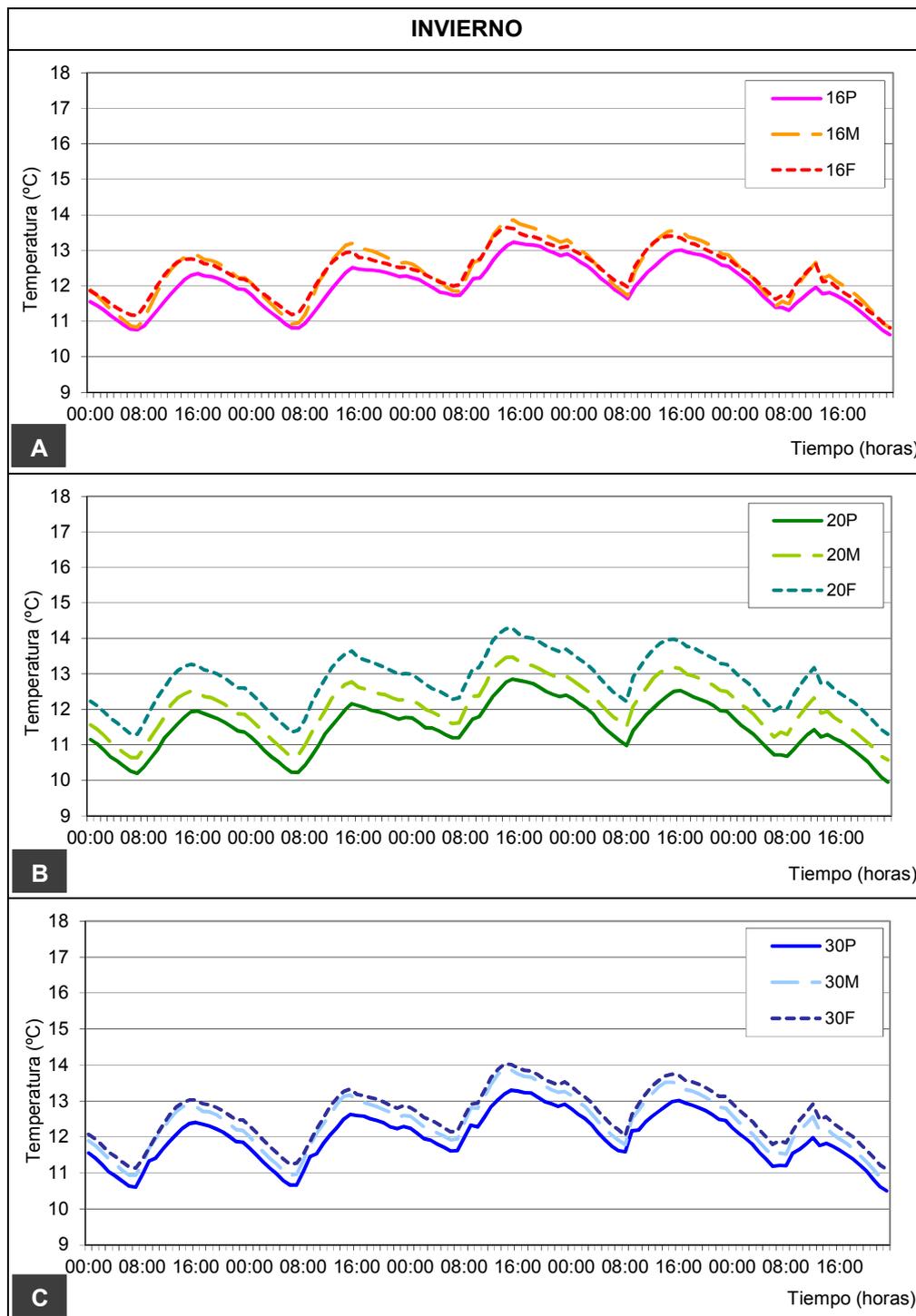


Figura 3: Temperaturas simuladas en el interior de la vivienda ubicada en cada canal de estudio, durante el invierno. A) CVU de 16 m de ancho; B) CVU de 20 m de ancho; C) CVU de 30 m de ancho. P: *Platanus hispanica*; M: *Morus alba*; F: *Fraxinus excelsior*.

En las viviendas ubicadas en cañones urbanos de 20 m de ancho se observan las mayores diferencias entre sus temperaturas interiores de acuerdo a la especie forestal. Existe un promedio superior a medio grado ($0,6^{\circ}\text{C}$) de diferencia entre la residencia más fresca (situada en el CVU con plátanos) y aquella que se encuentra en el CVU forestado con moreras; mientras que la vivienda inserta en el canal vial forestado con fresnos es aproximadamente un grado ($0,8^{\circ}\text{C}$) más cálida (Figura 3b).

En el Figura 3c se puede observar la curva correspondiente a la temperatura interior de invierno en las viviendas localizadas en CVU de 30 m de ancho. Estas curvas muestran una situación intermedia entre los dos casos anteriores ya que si bien el comportamiento de las curvas es semejante dado que su orden es el mismo que en los CVU de 20 m, la diferencia de temperatura es menor.

En todas las situaciones evaluadas el prototipo simulado en el cañón urbano de 20 m de ancho forestado con plátanos es el más fresco de todos. Al realizar un análisis de las curvas por especie, vemos que cuando la vivienda se inserta en canales forestados con fresnos presenta las mayores temperaturas interiores de invierno tanto en los canales de 20 m como de 30 m, que muestran similitud en los valores de la temperatura interior de la vivienda, sin embargo la vivienda situada en el CVU de 16 m presenta temperaturas interiores de invierno levemente inferiores. En el caso de moreras y plátanos, cuando la vivienda se inserta en los CVU de 16 y 30 m muestra temperaturas interiores de invierno muy similares, mientras que cuando se inserta en CVU de 20 m es más fresca. Esto sostiene la hipótesis de que es la combinación entre el acceso a la radiación solar y la condición de abrigo que ofrece un canal vial, el efecto que comanda la temperatura interior de la vivienda. Dado que el canal de 16 m compensa con el encajonamiento (condición de abrigo) su menor acceso a la radiación solar, mientras que el canal de 30 m logra con un mayor acceso a la radiación solar (para el caso de plátanos y moreras) y tiene mayor exposición para el enfriamiento radiante y convectivo.

Temperaturas interiores estivales. En el análisis del verano se puede decir que las viviendas más calurosas son las ubicadas en CVU de 30 m de ancho y de éstos, el forestado con fresnos presenta la situación más crítica. Esto se explica principalmente en base del gran factor de visión de cielo que presenta este CVU cuyo valor es de 75%, que sumado a la relación entre la forma del espacio y el recorrido solar, aumenta su condición de acceso al sol. Cabe mencionar que las diferencias entre viviendas ubicadas en distintos canales se mantienen relativamente constantes a lo largo del día.

La temperatura interior de verano de la vivienda localizada en cañones urbanos de 16 m de ancho se presenta en el Figura 4a. Dentro de este ancho de canal vial, la vivienda a la sombra de moreras es la más cálida con una temperatura máxima media de 31,6°C. El “hueco” que presenta este canal vial determina una alta proporción de radiación solar que llega tanto a pavimentos vehiculares y peatonales como a las fachadas, donde parte es acumulada y parte es reflejada. Con una diferencia de aproximadamente 1°C, le sigue la edificación a la sombra de fresnos y por último se encuentra aquella sombreada por plátanos con 28,5°C de temperatura máxima media. Es decir una diferencia en la temperatura interior de la vivienda superior a 2°C entre la localización más favorable y la menos.

En cuanto a los CVU de 20 m de ancho, se observa una diferencia importante de temperatura interior de verano entre la vivienda ubicada en el canal forestado con fresnos y la ubicada en el canal forestado con moreras (1,7°C). A su vez, el local 5 sombreado con plátanos es en promedio 1°C más fresco que el sombreado con moreras de manera que obtiene las mínimas temperaturas observadas con alrededor de 27,2°C de temperatura mínima media, es decir aproximadamente 3°C de diferencia en la temperatura interior como consecuencia de la localización más favorable (plátanos) y la más desfavorable (fresnos) (Figura 4b). Cabe destacar que las temperaturas simuladas bajo las condiciones del CVU de 20 m de ancho forestado con plátanos en verano son las únicas que entran dentro de los rangos de confort sugeridos por Givoni (1998).

Por último, se encuentran las viviendas simuladas bajo las condiciones microclimáticas de los canales viales de 30 m de ancho (Figura 4c). El prototipo ubicado en el CVU forestado con fresnos presenta la mayor temperatura interior con máximas de alrededor de 32,4°C. Aquel que se encuentra en el CVU forestado con moreras es 0,9°C más fresco y le sigue el que está a la sombra de plátanos con 0,8°C menos en promedio. Es decir una diferencia superior a 1,5°C entre la temperatura interior de la vivienda en la localización más favorable y la menos.

Para el caso de verano, nuevamente se concluye que como era de esperar la variable exterior de mayor influencia sobre la temperatura interior es la condición de acceso al sol que cada una de las estructuras evaluadas presenta.

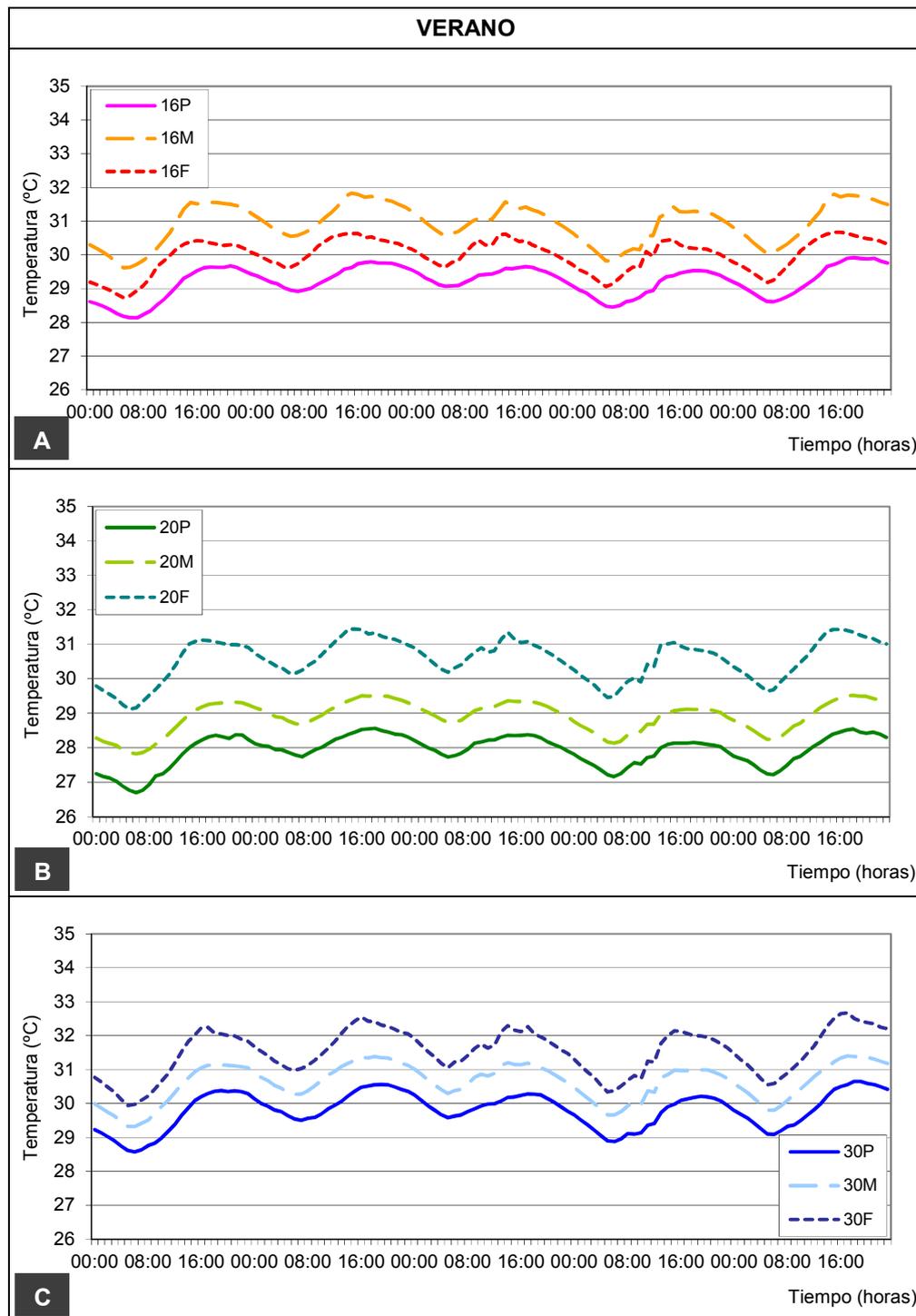


Figura 4: Temperaturas simuladas en el interior de la vivienda ubicada en cada canal de estudio, durante el verano. A) CVU de 16 m de ancho; B) CVU de 20 m de ancho; C) CVU de 30 m de ancho. P: *Platanus hispanica*; M: *Morus alba*; F: *Fraxinus excelsior*.

Consumo energético en el interior de la vivienda

Se decidió termostatar cada local a temperaturas interiores de 20°C en invierno y 25°C en verano, a fin de observar su efecto en la energía auxiliar de calefacción y refrigeración (Givoni, 1998). En la Figura 5 se muestra el consumo energético diario para cada estación en los casos de estudio analizados. El consumo de calefacción en invierno está en el orden de los 445-510 MJ/día para la vivienda completa, mientras que la carga diaria de refrigeración en el verano varía entre los 280 y los 400 MJ/día. Esto significa que el invierno es alrededor del 37% más crítico que la estación estival en el Área Metropolitana de Mendoza, lo cual se condice con resultados obtenidos en trabajos previos (Mercado et al., 2010; Barea et al., 2009).

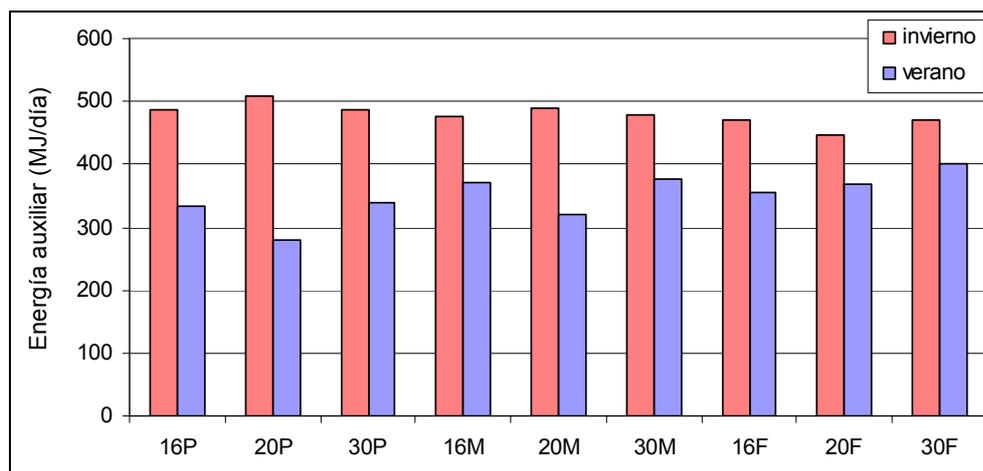


Figura 5: Consumo de energía diario para la vivienda estudiada en cada uno de los CVU seleccionados, en invierno y en verano. P: *Platanus hispanica*; M: *Morus alba*; F: *Fraxinus excelsior*. 16: CVU de 16 m de ancho; 20: CVU de 20 m de ancho; 30: CVU de 30 m de ancho.

Por otro lado, se puede observar la mayor influencia de la vegetación durante el verano evidenciada por las mayores diferencias entre los SVF y su relación con la trayectoria solar (acceso al sol) de los distintos canales viales estudiados. Este fenómeno es coherente con el hecho de que los forestales evaluados, así como la mayoría de los utilizados en el AMM como arbolado en alineación, son especies caducifolias, por lo cual pierden las hojas en el invierno ya que entran en reposo vegetativo.

En el análisis de la situación de invierno, se puede ver que la vivienda ubicada en el canal vial de 20 m de ancho forestado con plátanos necesita la mayor cantidad de energía para mantenerse a 20°C, mientras que el menor consumo de energía por calefacción está representado por el prototipo simulado en el cañón urbano también de 20 m de ancho, pero forestado con *F. excelsior* (12% menos), especie de menor desarrollo de copa y que, por lo tanto, permite un mayor acceso a la radiación solar. Esta situación se condice con las temperaturas interiores que se muestran en el apartado precedente.

La energía necesaria para mantener la temperatura interior en 25°C durante el verano es mínima en la casa localizada en el canal vial de 20 m de ancho forestado con plátanos y máxima en aquella que se ha simulado en el CVU de 30 m de ancho forestado con fresnos (43% más). Es decir que la vivienda ubicada en el CVU de 20 m de ancho forestado con *P. hispanica* consume 30 % menos de energía que la residencia localizada en el canal de 30 m forestado con *F. excelsior*.

Para poder comparar con otro tipo de viviendas, se consideran los valores de energía auxiliar por unidad de superficie. La vivienda ubicada en el CVU de 20 m de ancho forestado con *P. hispanica* consume 0,07 m³ de gas natural por día y por m² en invierno y 0,73 kWh/m² diarios en verano. En cambio, la residencia localizada en el canal de 30 m forestado con *F. excelsior* consume 0,06 m³/m² diarios en invierno y 1,00 kWh/m² diarios en verano.

Cabe destacar que la forestación con moreras resulta en un caso intermedio entre los plátanos y los fresnos. Se trata de una especie de segunda magnitud al igual que el fresno, pero presenta una mayor superposición de copas (a la distancia que habitualmente es plantada en la ciudad de estudio) que la asemeja a *P. hispanica*.

Como se ha dicho precedentemente, el caso que permite el mayor ahorro energético durante el verano, causa también el mayor gasto de energía en el invierno. Este hecho reconoce la gran importancia del recurso solar en ciudades de zonas áridas como el AMM, que es determinante de la mayor parte de los procesos de intercambio de calor que se producen en los espacios abiertos e interfieren, como se manifiesta en este trabajo, con los espacios interiores.

Por otro lado, es necesario destacar que el consumo energético de la vivienda puede ser disminuido mediante intervenciones edilicias (utilización de pinturas reflectivas, aislación térmica, etc.), las cuales tienden a generar mayores beneficios con un costo también más alto (Filippin y Flores Larsen, 2006). Sin embargo, cuando las posibilidades de acondicionamiento interior se ven reducidas y se desean minimizar los consumos energéticos mediante el acondicionamiento del espacio urbano y la adecuada elección de la vegetación, es claro que los mismos deben ser establecidos, según lo evaluado, en la estación estival ya que es cuando se observan las influencias más importantes del verde urbano en los consumos energéticos residenciales.

CONCLUSIONES

El presente trabajo estudia del comportamiento de las temperaturas interiores de un prototipo representativo de vivienda y sus consumos energéticos necesarios para alcanzar la condición de confort tanto en invierno como en verano cuando el mismo es localizado en canales viales urbanos típicos de la zona de baja densidad edilicia del Área Metropolitana de Mendoza (AMM). Esto ha posibilitado la identificación y comprensión de los fenómenos de transferencia de calor y masa que tienen lugar en el sistema vegetación-microclima. Los comportamientos observados responden claramente a las características de crecimiento y desarrollo de los esquemas forestales evaluados y su vinculación con los recursos climáticos y la morfología de la ciudad.

Desde el punto de vista energético, se recomiendan, para la baja densidad edilicia, los esquemas urbanos que confluyen en una baja radiación solar y una suficiente incidencia del viento, características de los canales viales de 20 m de ancho forestados con plátanos o moreras. Los mismos generan un ahorro de refrigeración diaria en el verano de hasta 30 %.

Estos resultados confirman la influencia del entorno urbano en los consumos energéticos residenciales asociados y brindan parámetros que pueden ser de utilidad en la confección de futuros planes de forestación o reforestación de las ciudades de zonas áridas. Si bien, en el futuro se validará este trabajo con mediciones reales de consumos y temperaturas en viviendas ubicadas en los CVU evaluados, actualmente se aportan criterios susceptibles de ser incorporados en los códigos urbanos a fin de vincular de la fisonomía forestal con la morfología urbana, sobre todo en “ciudades oasis” donde el rol de la forestación es clave para garantizar la sustentabilidad del desarrollo urbano.

REFERENCIAS

- Akbari H., Davis S., Dorsano S., Huang J. y Winert S. (Eds.) (1992). *Cooling our Communities. A Guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing*. US Environmental Protection Agency, Office of Policy Analysis, Climate Change Division, Washington.
- Barea G., Ganem C. y Esteves A. (2009). Análisis térmico invernal de una vivienda unifamiliar no-tradicional en la Ciudad de Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 13(5), 195-202.
- Bórmida E. (1984). Mendoza, una ciudad oasis. *Summa* 226, 68-72.
- Correa E., Ruiz M. A., Cantón M. A. y Lesino G. (2012). Thermal comfort in forested urban canyons of low building density. An assessment for the city of Mendoza, Argentina. *Building and Environment* 58, 219–230.
- Correa E. (2006). *Isla de Calor Urbana. El Caso del Área Metropolitana de Mendoza* (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas, Salta, Argentina.
- Cui L. y Shi J., (2012). Urbanization and its environmental effects in Shanghai, China. *Urban Climate* 2, 1-15.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2ª edición, pp. 54-59. Wiley Interscience, New York.
- Filippin C. y Flores Larsen S. (2006). Comportamiento energético de verano de una vivienda convencional en la región central de Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 10(5), 9-14.
- Flores Larsen S., Filippin C. y Lesino G. (2004). Monitoreo y simulación térmica de temperaturas superficiales de paredes. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 8(5), 145-150.

- Flores Larsen S., Lesino G., Saravia L. y Alía D. (2000). SIMEDIF para Windows. INENCO, Salta. Disponible en: <http://inenco.unsa.edu.ar/~seflores/>. Último acceso: 15 junio 2012.
- Flores Larsen S. y Lesino G. (2000). SIMEDIF 2000: nueva versión del programa de diseño y cálculo de edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 4(8), 53-58.
- Ganem C. (2006). *Rehabilitación Ambiental de Viviendas. El caso de Mendoza*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Givoni B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Hernandez A. y Lesino G. (2000). Simulación mediante SIMEDIF del comportamiento térmico de un prototipo de vivienda liviana construido en la Universidad Nacional de Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 4(8), 29-34.
- Incropera P. y Dewitt D. (1996). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- INDEC (2012). *Publicación del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Censo del Bicentenario. Resultados definitivos. Serie B N° 2*. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Buenos Aires, Argentina.
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B. y Rubel F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15(3), 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- McPherson E. G. (1988). Functions of Buffer Plantings in Urban Environments. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 22, 281-298.
- Mercado M. V. Esteves, A. y Filippin, C. (2010). Comportamiento térmico-energético de una vivienda social de la ciudad de Mendoza. Argentina. *Ambiente Construido* 10, 87-101.
- Morakinyo T. E., Balogun A. A. y Adegun O. B. (2013). Comparing the effect of trees on thermal conditions of two typical urban buildings. *Urban Climate* 3, 76-93.
- Oke T. R. (2004). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. IOM Report No. 81, WMO/TD No. 1250. World Meteorological Organization. Ginebra, Suiza.
- Oke T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7, 769-779.
- Pérez-Lombard L., Ortiz J. y Pout C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings* 40, 394-398.
- Robinette G. O. (1972). *Plants / People / and Environmental Quality*. U.S. Department of the Interior, National Park Service, Washington D.C & ASLAF.
- Ruiz M. A. (2013). *Efectos microclimáticos de la vegetación en ciudades de zonas áridas. Incidencia sobre los consumos energéticos y la calidad ambiental del hábitat (Tesis doctoral)*. Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas, Salta, Argentina.
- Santamouris M., Papanikolaou N., Livada I., Koronakis I., Georgakis C., Argiriou A. y Assimakopoulos D. N. (2001). On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Solar Energy* 70(3), 201-216.
- Thorsson S., Tsuyoshi H., Fredrik L., Ingegård E. y Eun-Mi L. (2004). Thermal comfort conditions and patterns of behavior in outdoor urban spaces in Tokyo, Japan. *Proceedings of 21st Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Eindhoven, The Netherlands.

ABSTRACT

In the city of Mendoza the afforestation has been used to control the intense characteristic solar radiation and improve the livability of spaces. However, the urban heat island is 6°C on average with energy-environmental consequences that emphasize the need to rethink how afforest the city. The ultimate goal is to identify the most efficient schemes in order to reduce residential energy consumption and generate feasible technical proposals to incorporate into building codes. For this purpose, nine urban canyons were monitored in winter and summer. The thermal behavior of an inserted dwelling prototype in each of these canyons was simulated with SIMEDIF in order to estimate its energy consumption. The results indicate that urban canyons of low solar radiation and good wind circulation are those that minimize auxiliary power consumption.

Keywords: residential energy consumption; forested urban canyons; oasis city; arid zone.