

# EFFECTOS DEL CALENTAMIENTO GLOBAL SOBRE EL CONSUMO DE ENERGÍA EN LA CIUDAD DE CÓRDOBA, ARGENTINA

## EFFECTS OF GLOBAL WARMING ON ENERGY CONSUMPTION IN CORDOBA CITY, ARGENTINA

A.C. DE LA CASA Y O.B. NASELLO

Facultad de Ciencias Agropecuarias - Universidad Nacional de Córdoba. e-mail: delacasa@agro.unc.edu.ar  
Facultad de Matemática Astronomía y Física - Universidad Nacional de Córdoba. IFEG CONICET.  
Medina Allende s/n Ciudad Universitaria (5000) Córdoba, Argentina. e-mail: [nasello@famaf.unc.edu.ar](mailto:nasello@famaf.unc.edu.ar)

Recibido: 22/10/2013; Aceptado: 04/07/2014

En este trabajo se estima la variación de la demanda de energía residencial para la ciudad de Córdoba en el período 1960-2011, a partir de los grados-día de calefacción (HDD) y grados-día de enfriamiento (CDD), y se utilizan además los registros de temperatura de Pajas Blancas y Pilar, como contraparte rural, para distinguir entre los efectos del calentamiento global y de la "isla de calor urbana". La influencia del calentamiento global se pone de manifiesto con una tendencia decreciente de HDD en todas las estaciones, mientras resulta creciente para CDD. Además, por efecto de "isla de calor urbana", los valores de HDD en Córdoba son inferiores y los de CDD superiores a los de Pajas Blancas y Pilar, siendo estas diferencias constantes durante todo el periodo. Se observa también que al modificar los umbrales de temperaturas consideradas de confort ( $T_b$ ), es posible reducir de manera substancial la demanda de energía. Una pequeña reducción de  $T_b$  de 18°C a 15°C representaría para la ciudad de Córdoba un ahorro de 52% del requerimiento de energía para calefacción, en tanto el aumento de  $T_b$  de 18°C a 21°C reduciría la demanda de energía para refrigeración en el orden de 53%.

Palabras clave: calentamiento global, isla de calor urbana, HDD y CDD, demanda de energía.

This study estimates the change in residential energy demand for Córdoba city in the period 1960-2011, from the heating degree days (HDD) and cooling degree days (CDD) concepts, using also information of Pilar and Pajas Blancas airport as the rural counterpart. Because the global warming all weather stations shows that the trend of HDD is decreasing, while it increased for CDD. Furthermore, the urban heat island (UHI) effect in Córdoba establishes that HDD values are lower and those of CDD are higher than Pajas Blancas airport and Pilar, but the differences between rural and urban behaviors throughout the period are constants. It is also observed that changing the thresholds of the considered comfort temperatures ( $T_b$ ), the demand of energy can be substantially reduced. A small reduction in  $T_b$  of 18 °C to 15 °C represent for the city of Córdoba save 52% of energy requirements for heating, while the increase in  $T_b$  of 18°C to 21 °C would reduce the energy demand for cooling in the order of 53% .

Key Word: global warming, urban heat island, HDD and CDD, power demand.

### I. INTRODUCCIÓN

El régimen térmico de una ciudad a lo largo del tiempo puede variar por dos factores: uno producido por el cambio climático general que se atribuye al fenómeno de calentamiento global y, el otro, ocasionado por los cambios que ocurren en las ciudades debido al incremento de la población, disminución de cobertura verde del suelo, aumento de la capacidad calorífica de los edificios, etc., efecto de carácter local que se conoce como Isla de Calor Urbana (UHI, por sus siglas en inglés).

Estos cambios de la temperatura producen una variación natural del consumo de la energía domiciliar necesaria para mantener el confort en los hogares. En la actualidad, la ingeniería y la arquitectura ambiental tienen como desafío mantener confortable el interior de los ambientes, haciendo ahorro de la mayor cantidad de energía posible. Sin embargo, la condición de confort

térmico no está unívocamente establecida por variables físicas químicas, sino también depende de variables psicológicas, etéreas, actividad física, etc., por lo cual es muy difícil de modelar (De Dear, 2004; van Hoof et al., 2010).

Estudios previos han demostrado que la temperatura del aire es la variable meteorológica más importante relacionada con la evaluación de la demanda de energía requerida para acondicionar los hogares, mientras que otras variables atmosféricas (humedad, velocidad del viento, etc.), si bien están relacionadas con el bienestar térmico, son menos relevantes para estimar el consumo de energía (Engle et al., 1992; Yan, 1998). Por esta razón, en una etapa inicial de prospección, el trabajo analiza sólo el impacto de la temperatura del aire sobre el consumo de energía, dejando el estudio más integral de la influencia de otras condiciones atmosféricas para más adelante.

Los indicadores climáticos más utilizados para calcular la demanda de energía residencial, para una ciudad o una región, son los grados-día de calentamiento (HDD, por sus siglas en inglés) y de enfriamiento (CDD) (Heims et al., 2003). Esencialmente, estas variables resultan de acumular diariamente las diferencias entre la temperatura del aire exterior y una temperatura de referencia,  $T_b$ , que también se conoce como temperatura del punto de base o equilibrio. Este valor  $T_b$  es la temperatura del aire exterior a partir de la cual los sistemas de calefacción o refrigeración necesitan ser activados con el fin de mantener las condiciones de confort.

Los trabajos que estiman los requerimientos de energía establecen distintos umbrales de  $T_b$  para expresar la condición de confort. Con temperaturas de 21°C durante el invierno y de 25°C en el verano, Rodríguez y Fedrizzi (2010) consideran que se alcanza una calidad de confort en el interior de las habitaciones. Filippín (2005), a fin de establecer el uso de energía para diferentes edificaciones en La Pampa, Argentina, utiliza  $T_b$  de 18°C y 23°C para evaluar los HDD y CDD, respectivamente. Christenson et al. (2006), que evaluaron el impacto del cambio climático sobre la demanda de energía en Suiza, utilizan  $T_b$  de 8°C, 10°C y 12°C para calcular los HDD, y adoptan los umbrales de 18°C, 20°C y 22°C para computar los CDD y estimar los requerimientos de refrigeración.

Aparte de su uso para estimar la demanda de energía, HDD y CDD se emplean ampliamente como indicadores del impacto de cambio climático, en particular por el aumento de la temperatura (Mourshed, 2011).

Una característica común en muchos estudios a partir de registros térmicos en distintas regiones del mundo es la existencia de tendencias decrecientes en HDD y creciente en CDD. Sin embargo, en Turquía también ha habido tendencias crecientes de HDD en algunas estaciones y, en otras, la tendencia creciente de CDD no resultó estadísticamente significativa (Kadioglu et al., 2001).

Los objetivos de este trabajo son: (i) analizar la variación de la temperatura del aire en la ciudad de Córdoba, Argentina, en el periodo 1960-2011 y compararla con los registros de las estaciones rurales y suburbanas cercanas a Córdoba como referencia de las condiciones térmicas regionales. De esta forma, se procura discriminar entre las variaciones de la temperatura de carácter regional y aquellas ocasionadas por el efecto de la isla de calor. (ii) evaluar la influencia de estos cambios sobre los grados-día de calentamiento (HDD) y de enfriamiento (CDD), como una manera de establecer el aumento del consumo de energía ocurrido en la ciudad de Córdoba y alrededores producido por el cambio de la temperatura en la región.

## II. MATERIAL Y MÉTODOS

Los datos de temperatura analizados fueron obtenidos de 3 estaciones meteorológicas operadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Argentina en la provincia de Córdoba. Ellas son el Observatorio Córdoba (BO), el aeropuerto de Pajas Blancas (PB) y el Observatorio Pilar (PI), que están ubicadas como indica la Tabla 1 y se pueden localizar geográficamente en la Figura 1.

La población de la ciudad de Córdoba ha crecido en el último siglo, y actualmente cuenta con 1.300.000 habitantes. La estación meteorológica del Aeropuerto de Pajas Blancas está situada en las afueras de la ciudad, a 11,5 km hacia el Norte de la estación BO (ver Figura 1). La estación meteorológica de Pilar Observatorio (PI) se encuentra en la ciudad del mismo nombre, con una población de sólo 13.000, y está a 41,4 km de BO en una zona predominantemente rural, por lo que la influencia urbana tiene un impacto mínimo sobre el régimen térmico. Aunque hay pequeñas diferencias en latitud y altitud entre estaciones, el relieve entre Córdoba y Pilar es plano, por lo que no hay factores climáticos que modifican la expresión de los datos, excepto la propia dinámica del clima.

TABLA 1. ESTACIONES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS

Estación meteorológica	ID	Latitud	Longitud	Altitud (m s.n.m.)
Aeropuerto Pajas Blancas	PB	31°19'S	64°13'W	474
Observatorio Córdoba	BO	31°24'S	64°11'W	425
Observatorio Pilar	PI	31°40'S	63°53'W	338

El régimen térmico se analizó a partir de los registros diarios de la temperatura máxima ( $T_{max}$ ) y mínima ( $T_{min}$ ) para el período 1960-2011. Si bien estos registros presentan sus propias incertidumbres (Li y Hubbard, 2008), los datos de temperatura máxima y mínima diarias no están sujetos a ningún procedimiento de cálculo, como las temperaturas medias (Braganza et al., 2004) y, además, se han identificado como indicadores particularmente sensibles del cambio climático (Brown et al., 2008).

El efecto de la Isla de Calor Urbana se puede cuantificar haciendo la diferencia entre la temperatura de una estación urbana y otra rural (Stewart y Oke, 2012). A partir de valores de temperatura horarios y considerando sólo estaciones meteorológicas del cañón urbano para homogeneizar las condiciones de exposición. Steeneveld et al. (2011) utilizan la máxima diferencia diaria como indicador de UHI, y emplean la relación entre la mediana y el percentil 95 (P95) para caracterizar el clima de distintas ciudades de Holanda. En este trabajo, no disponiendo de registros de temperatura horarios, se utilizó la diferencia de  $T_{max}$  como de  $T_{min}$  entre los valores de la ciudad (BO) y del ámbito rural (PB y PI), a

los efectos de conocer del grado de calentamiento producido por el efecto UHI en la ciudad de Córdoba

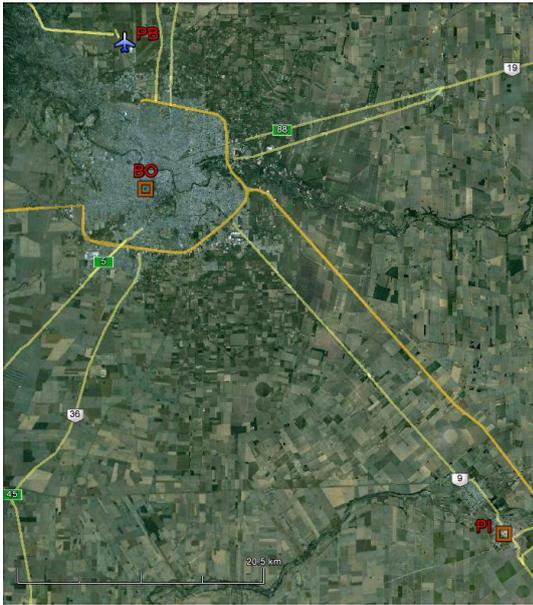


Figura 1. Imagen con la localización de las estaciones meteorológicas: BO, PB y PI.

Nuevamente, de acuerdo al tipo de registro disponible de la temperatura del aire, diferentes métodos pueden ser utilizados para realizar el cálculo de los grados-día de calefacción (HDD) y refrigeración (CDD) (Erb et al., 1983; Hitchin, 1983; Schoenau y Kehrig, 1990). En este trabajo, los cálculos se realizaron a partir de los valores diarios de la temperatura máxima ( $T_{max}$ ) y mínima ( $T_{min}$ ), de acuerdo con la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, 2009), teniendo en cuenta tres temperaturas base ( $T_b$ ): 15°C, 18°C y 21°C (Valor et al., 2001; Ortiz Beviá et al., 2012). Los cálculos para computar diariamente HDD y CDD se realizaron de la siguiente manera:

$$HDD = (T_b - T_d)^+ \quad (1)$$

$$CDD = (T_d - T_b)^+ \quad (2)$$

Donde el signo positivo indica que sólo los valores mayores a cero son acumulados cada año, y  $T_d$  es el valor de temperatura media diaria calculada con los extremos diarios ( $T_d = (T_{max} + T_{min})/2$ ).

En todos los casos, se calcularon las líneas de tendencias y sus niveles de significación utilizando el test de Mann-Kendall (Sneyers, 1990). El estadístico no paramétrico de Mann-Kendall,  $S$ , se calculó según la fórmula:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (3)$$

donde  $x_j$  y  $x_k$  son los valores de la temperatura media anual en los años  $j$  y  $k$ , con  $j > k$ , y

$$\text{sign}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

Los valores de  $S$  y de su varianza ( $VAR(S)$ ) son utilizados para computar el test estadístico de  $Z$  como:

$$Z = S - \text{sign}(S)/VAR(S)$$

La significación estadística de la tendencia es evaluada utilizando el valor de  $Z$  de una distribución normal. Para evaluar tanto una tendencia monótonica creciente o decreciente se aplica una prueba de  $Z$  de dos colas, con los siguientes niveles de significación  $\alpha$  ( $\alpha = 0,001$  (\*\*\*),  $0,01$  (\*\*),  $0,05$  (\*) y  $0,1$  (+)).

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Evaluación de la isla de calor urbano (UHI) de la ciudad de Córdoba.

La información mensual de las temperaturas extremas del aire de las estaciones BO, PB y PI, se utilizó a fin de describir la condición térmica de la región central de la provincia de Córdoba en términos climáticos. La Figura 2 presenta, tanto los valores mensuales medios como extremos del periodo 2001-2010 de las tres estaciones meteorológicas.

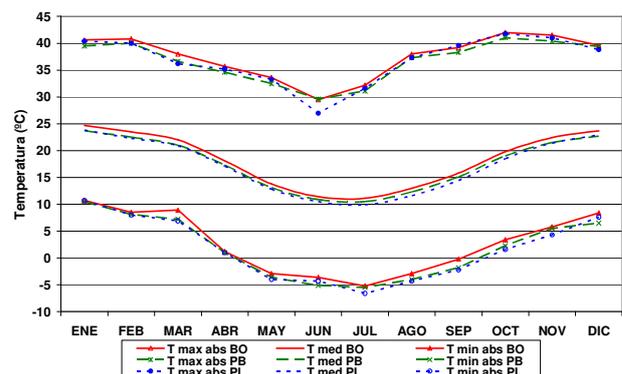


Figura 2. Valores mensuales de las temperaturas máxima absoluta, media y mínima absoluta de Córdoba (BO), Pajas Blancas (PB) y Pilar (PI) del periodo 2001-2010.

En esta figura, el efecto de isla de calor en la ciudad de Córdoba se pone en evidencia en la medida que BO registra valores de temperatura siempre más elevados a los de PB y de PI. A pesar de la mayor distancia y diferencia de latitud, los valores térmicos de PB y PI son más semejantes entre si que respecto a las mediciones de BO. La variación de la temperatura a lo largo del año acusa un comportamiento estacional moderado, típico para una región de latitud media en el Hemisferio Sur. Los registros térmicos superiores al valor medio anual desde octubre a marzo ponen de manifiesto el requerimiento de refrigeración en esta parte del año, mientras que su disminución durante el semestre frío son indicativos de la demanda de calefacción.

En la Figura 3 se muestra la evolución de la temperatura media anual calculada a partir de los valores extremos diarios de BO, PI y PB a lo largo del período

1970-2010. En esta figura se observa que las temperaturas de PI y PB son muy similares entre sí y sistemáticamente inferiores a la de BO, mostrando claramente el efecto de isla de calor urbana de la ciudad de Córdoba. En esta figura se observa además que la diferencia entre la zona "rural" (PI y PB) y la urbana (BO) se ha mantenido aproximadamente constante a lo largo del tiempo.

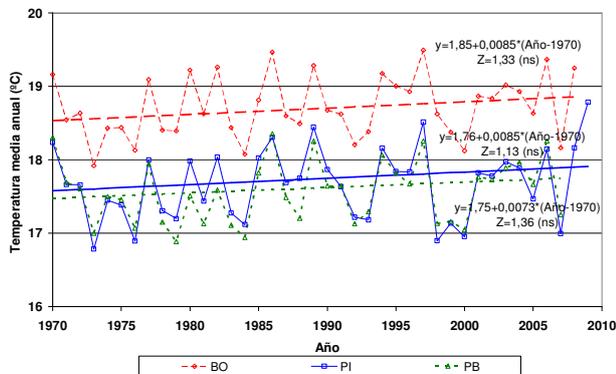


Figura 3. Variación de la temperatura media anual en las estaciones Córdoba Observatorio (BO), Pilar Observatorio (PI) y Aeropuerto Pajas Blancas (PB) a lo largo del período 1970-2010. Se presenta la función de ajuste y el valor de Mann-Kendall (Z) de cada sitio.

### 3.2 Evaluación de la demanda de energía

El impacto de calentamiento global sobre la demanda de energía de la ciudad de Córdoba fue analizado evaluando HDD y CDD a partir de Eq. 1 y Eq. 2, usando tres valores de  $T_b$ : 15°C, 18°C y 21°C. Las Figuras 4 y 5 muestran los cambios tanto de HDD y CDD para el periodo completo desde 1960 a 2011 en las ciudades de Córdoba y Pilar.

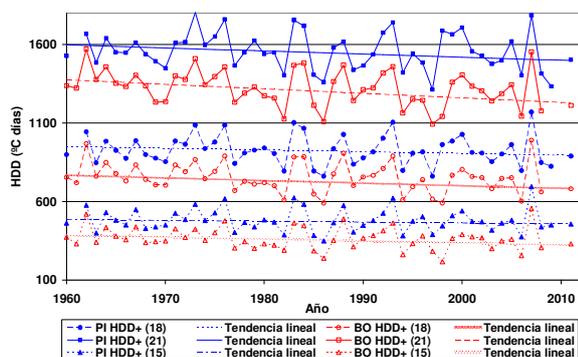


Figura 4. Grados días de calefacción (HDD) en Córdoba (BO) y Pilar (PI), Argentina, con temperaturas bases ( $T_b$ ) de 15, 18 and 21 °C para el periodo 1960-2011 y sus correspondientes ajustes lineales.

Los resultados del test no paramétrico de Mann-Kendall para todos los casos mostrados en las dos figuras anteriormente citadas se muestran en la Tabla 2.

En las Figuras 4 y 5 se observa que en general los valores de HDD tienden a decrecer mientras que los de CDD muestran tasas crecientes. Se observa, además, los comportamientos lógicamente esperados que se producen en estas variables tanto al cambiar la  $T_b$  como al pasar de una zona rural a una urbana.

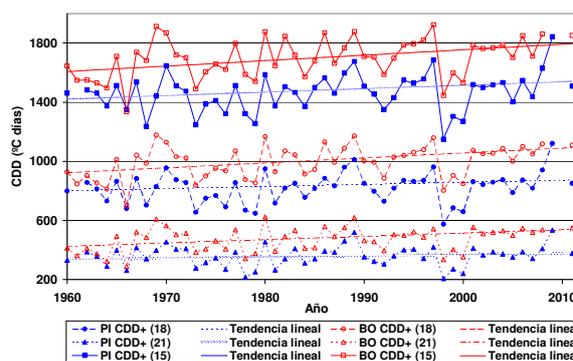


Figura 5. Idem fig. 4 para grados días de refrigeración (CDD)

En la Tabla 2 se observa para todo el periodo analizado, reducciones de HDD e incrementos de CDD de carácter significativo en ambos casos. Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos por otros autores (Christenson et al., 2006; Ortiz Beviá et al., 2012). Es posible reconocer el efecto de UHI en la ciudad de Córdoba en la medida que al registrarse temperaturas más elevadas el ambiente urbano presenta siempre mayor demanda de refrigeración en verano respecto al ambiente rural, en tanto resulta también más baja la demanda de energía durante el invierno. La variación de largo plazo en la demanda de energía muestra, compatible con el fenómeno de calentamiento global, una tendencia negativa de HDD de 1,2, 1,5 y 2,5 °C días al año, para las temperaturas de base  $T_b$  de 15°C, 18°C y 21°C, respectivamente, denotando la disminución del requerimiento de calefacción en la actualidad y, por el contrario, una tendencia positiva en la demanda de refrigeración de 3,7, 2,9 y 1,8°C días por año. Además, se observa que en la región rural las tasas de variación han sido siempre menores que en la zona urbana lo que muestra que si bien el aumento de temperatura promedio en las zonas rurales y urbanas han sido similares (ver figura 3) el efecto del calentamiento general sobre el consumo de energía se hace más notable en la ciudad.

La variación de los HDD y CDD en la ciudad de Córdoba obedece, además de la dinámica inherente al estado atmosférico de cada año, a su condición particular de isla de calor urbano. La diferencia entre la demanda de energía para refrigeración en verano es 26%, 20% y 16% superior en Córdoba respecto a Pilar, para  $T_b$  de 21, 18 y 15°C, respectivamente. Asimismo, la diferencia en la demanda por calefacción en invierno se invierte, ya que para Córdoba resulta 17%, 20% y 26% menor con relación a Pilar, para  $T_b$  de 21, 18 y 15°C, respectivamente. Se pone en evidencia también que al modificar los umbrales de  $T_b$ , supeditado a la condición de confort térmico considerada, es posible reducir de manera substancial la demanda de energía. Una pequeña reducción de  $T_b$  de 18°C a 15°C representaría para la ciudad de Córdoba un ahorro de 52% del requerimiento de energía para calefacción, en tanto el aumento de  $T_b$  de 18 a 21°C reduciría la demanda de energía para refrigeración en el orden de 53%.

TABLA 2. PRUEBA DE MANN-KENDALL (Z) SIGNIFICANCIA DE LA TENDENCIAS (S) DE LAS SERIES DE TIEMPO TÉRMICAS DE CÓRDOBA (BO) Y PILAR (PI) CON DIFERENTES VALORES DE  $T_b$ . Q (PENDIENTE) Y B (ORDENADA AL ORIGEN)

	$T_b$ (°C)	<i>Año inicial</i>	<i>Año final</i>	<i>N</i>	<i>Z</i>	<i>S</i>	<i>Q</i> °C día año <sup>-1</sup>	<i>B</i> °C día
HDD (BO)	15	1960	2008	49	-1,42		-1,196	384,25
	18	1960	2008	49	-1,61		-1,466	784,18
	21	1960	2008	49	-1,97	*	-2,498	1378,88
CDD (BO)	15	1960	2008	49	2,44	*	3,684	1607,03
	18	1960	2008	49	2,65	**	2,953	927,14
	21	1960	2008	49	2,22	*	1,832	434,02
HDD (PI)	15	1962	2011	50	-0,97		-0,544	484,86
	18	1962	2011	50	-1,26		-1,192	953,59
	21	1962	2011	50	-1,65	+	-2,153	1608,18
CDD (PI)	15	1962	2011	50	2,09	*	2,332	1421,10
	18	1962	2011	50	1,76	+	1,693	790,44
	21	1962	2011	50	1,04		0,758	338,45

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudia la variación que experimentó el régimen térmico de la ciudad de Córdoba, Argentina, a partir de datos de temperatura máxima y mínima del observatorio Córdoba, utilizando los registros del aeropuerto de Pajas Blancas (PB) y Pilar Observatorio (PI) como información de referencia en zonas rurales, con especial atención a los cambios en las necesidades de energía durante los últimos 50 años.

Los resultados encontrados muestran que los ambientes "rurales" de Pilar y Pajas Blancas presentan temperaturas promedios muy similares entre si y que, por el efecto isla de calor, la ciudad de Córdoba tiene en promedio temperaturas 1 a 2°C superiores. Además, las tres estaciones presentan tendencias similares de aumento de la temperatura.

Por otra parte, se observa que el efecto de isla de calor urbano de la ciudad de Córdoba produce en verano un ostensible incremento del requerimiento de energía respecto al entorno rural, como así también la disminución del requerimiento de calefacción en invierno.

En cuanto a los cambios de largo plazo que experimentaron los indicadores HDD y CDD se observa, al igual que en otras regiones del mundo, que por efecto del calentamiento global la región registra una tendencia creciente del consumo de energía para la refrigeración y una paulatina disminución del consumo de energía para calefacción, con un saldo neto positivo que hay que tener en cuenta al planificar la provisión de energía.

**Agradecimientos:** Queremos agradecer al Sr. José de Barcelona por su apoyo técnico, al Servicio Meteorológico Nacional por proporcionar los datos y a la SeCyT-UNC y el CONICET por la ayuda financiera.

#### Referencias

- ASHRAE. ASHRAE Handbook: Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA. (2009).
- Braganza, K., D.J. Karoly, J.M. Arblaster. Geophys. Res. Lett. 31, L13217, <http://dx.doi.org/10.1029/2004GL019998>. (2004).
- Brown, S.J., J. Caesar, and C.A.T. Ferro. Journal of Geophysical Research, 113: D05115, doi:10.1029/2006JD008091 (2008).
- Christenson, M., H. Manz, and D. Gyalistras. Energy Conversion and Management, 47, 671-686 (2006).
- de Dear, R. Indoor Air, 14(Suppl 7), 32-39 (2004).
- Engle, R., C. Mustafa, and J. Rice. Journal of Forecasting, 11, 241-251 (1992)
- Erbs, D., W. Beckman, and S. Klein. ASHRAE Journal, 25(6), 60-65 (1983)
- Filippín, C. Journal of Building Physics, 29, 69-89 (2005).
- Heims Jr., R.R., J.H. Lawrimore, D.B. Wuertz, A.M. Waple, and T.W.R. Wallis. Journal of Applied Meteorology, 42, 1435-1442 (2003).
- Hitchin, E.R. Building Services Engineering Research and Technology, 4(4), 159-162 (1983).
- Kadioglu, M., Z. Sen, and L. Gueltekin. Climatic Change, 49, 209-223 (2001).
- Li, X., and K.G. Hubbard. Int. J. Climatol. 28, 283-294 (2008).
- Mourshed, M. Applied Energy, 88(11), 3737-3746 (2011)
- Ortiz Beviá M.J., G. Sánchez-López, F.J. Alvarez-García, A. Ruiz de Elvira. Global and Planetary Change, 92-93, 236-247 (2012).

15. Rodríguez, J. y R. Fedrizzi. EURAC Research. 27 p. (2010).
16. Schoenau, G.J., and R.A. Kehrigh. Energy and Buildings, 14(4), 299-302 (1990).
17. Sneyers, R.. Tech. Note 143, WMO-No. 415. 192 pp (1990).
18. Steeneveld, G.J., S. Koopmans, B.G. Heusinkveld, L.W.A. van Hove, and A.A.M. Holtslag. Journal of Geophysical Research, 116, D20129, doi:10.1029/2011JD015988 (2011).
19. Stewart, I.D., and T.R. Oke. Available online (10.1175/BAMS-D-11-00019.2) (2012).
20. Valor, E., V. Meneu, and V. Caselles. Journal of Applied Meteorology, 40, 1413-1421 (2001).
21. Van Hoof J., M: Mazej, and J.L. Hensen. Front Biosci, 15, 765-88 (2010).