

EL CLIMA DE LAS CIUDADES: ISLA DE CALOR DE SALAMANCA

THE URBAN CLIMATE: URBAN HEAT ISLAND OF SALAMANCA

M^a Salud Alonso García, M^a del Rosario Fidalgo Martínez, José Luis Labajo Salazar

Dpto. Física General y de la Atmósfera. Facultad de Ciencias. Universidad de Salamanca

RESUMEN

En este trabajo se ha determinado la existencia de la isla de calor urbana (ICU), en una ciudad de tamaño medio, con un clima extremado y focos industriales de poca actividad. Con lo que se puede comprobar cómo afecta el calentamiento urbano a ciudades de estas características, pudiendo influir en los seres vivos de la zona. La existencia del fenómeno isla de calor, y su evolución en el tiempo, se han observado comparando los datos de temperatura registrados en una estación meteorológica situada en la ciudad, con los de otra estación fuera del radio de acción de la urbe, durante el período 1996-1998. Se han detectado dos fenómenos: la isla de calor nocturna, cuando la diferencia térmica entre la ciudad y la zona rural es positiva, que presenta sus valores más altos en otoño, y la isla de calor diurna, cuando la diferencia es negativa, que presenta sus valores más altos en primavera. Realizando un estudio estadístico de la evolución anual de la isla de calor nocturna en Salamanca, podemos definir isla de calor débil si su intensidad es inferior a 2 °C, moderada si se encuentra entre 2 °C y 4 °C e intensa si supera los 4 °C.

PALABRAS CLAVE: Isla de calor urbana, clima urbano, inversión de la isla de calor, morfología urbana, contaminación urbana, Salamanca.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día existe una gran preocupación por los efectos que tienen en la salud humana las alteraciones provocadas por el hombre en el medio ambiente. Ya es habitual el procurar salir de las grandes ciudades para poder respirar "aire puro", y es que la acción humana ha generado microclimas artificiales. Estas perturbaciones microclimáticas dan lugar a diferenciaciones claras entre el clima de las distintas ciudades, su área de acción, y el clima rural. Una de las principales diferencias es el aumento de la temperatura en las ciudades, producido por el proceso de urbanización. A este fenómeno se le denomina Isla de Calor Urbana, ICU¹.

ABSTRACT

We have determined the existence of the urban heat island (UHI) in a medium-sized city, with an extreme climate and few important foci of industrial pollution. It was seen that urban warming can arise in cities of these characteristics, being able to influence in the alive beings of the zone. By comparing the temperature series in an urban area and those from a nearby rural area, we studied the temporal evolution of the intensity of the UHI for the three-year period between 1996 and 1998. We detected two phenomenons: nocturnal heat island, when the difference of temperature between city and rural zone is positive, and diurnal heat island, when is negative. The most intense nocturnal heat island was seen in autumn, and the most intense diurnal heat island was seen in spring. Statistical study of the annual series corresponding to the night-time heat island permits a definition for Salamanca: a weak island, such as the one showing an intensity lower than 2.0 °C, a moderate island, if the intensity lies between 2.0 °C and 4.0 °C, and an intense island when a value greater than 4.0 °C is passed.

KEY WORDS: Urban heat island, urban microclimate, UHI sink, urban morphology, urban pollution, Salamanca.

La variación térmica en las ciudades no es la única consecuencia de esta alteración microclimática provocada por el hombre. También se han modificado otros factores meteorológicos como el viento, debido a la presencia de edificios que modifican tanto su módulo como su dirección, o la humedad, debido al uso de materiales de construcción impermeables. Pero sin duda hay que destacar la contaminación atmosférica, y en concreto la contaminación química, que dan a las ciudades una "atmósfera propia".

El conocimiento del clima urbano comienza a cobrar importancia cuando se demuestra que existe una clara relación entre los factores atmosféricos y la mortalidad². Kalstein³, en 1989, demostró que, en promedio diario, en

EE.UU se producen más muertes en los meses invernales que en la época cálida, pero que la relación entre mortalidad y meteorología es más pronunciada en los meses estivales, por lo que una intensidad fuerte en la isla de calor puede disparar las estadísticas. El mismo Kalstein⁴, en 1993, demostró que la relación entre la situación meteorológica y la mortalidad no es lineal, sino que existen umbrales térmicos a partir de los cuales el número de muertes se dispara. Alderson⁵, en 1985, con un estudio realizado en el Reino Unido, encontró una relación entre la temperatura y la mortalidad que indicaba que la variación en el número de muertes semanales está relacionada con la temperatura en un 80%. Este estudio indicaba que una variación en 1 °C en la temperatura media invernal intervenía como factor relevante en 8000 muertes en ese invierno.

Por otro lado, se han encontrado evidencias que relacionan la contaminación atmosférica y la mortalidad, especialmente por problemas respiratorios, pero el nivel de significación para este factor es menor que el de una situación sinóptica agresiva^{6,7}.

Por estas razones el estudio del clima de una ciudad puede ser de utilidad a la hora de mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Realizando un estudio del campo térmico superficial de la zona urbana se podría mejorar la morfología de la ciudad, introduciendo los materiales de construcción adecuados, y haciendo un uso correcto de las zonas verdes. Con ello se podrían lograr temperaturas más suaves, que ayudarían a mantener los niveles térmicos fuera de sus límites de riesgo para la salud. Por otro lado, podría ayudar a detectar focos de contaminación térmica, y con ello, entre otras cosas, a eliminar puntos de tráfico denso habitual, o a localizar zonas de emisión de contaminación perjudiciales.

A la hora de hacer un estudio climático de una ciudad los factores principales a tener en cuenta son: La morfología de la ciudad, las variables meteorológicas y la contaminación atmosférica.

En cuanto a la morfología de la ciudad, hay que tener en cuenta dos factores fundamentales: La distribución de los usos del suelo y la población⁸. La alta densidad de edificación, la mala distribución y la escasez de zonas verdes, o el exceso de asfalto, hacen aumentar la intensidad del fenómeno. Los edificios urbanos están contruidos con materiales que absorben la radiación solar de onda corta, y emiten energía en forma de radiación terrestre, de onda larga, a la cual la atmósfera es impermeable. Esto lleva a un aumento en la temperatura de las capas atmosféricas más bajas, efecto que puede ser contrarrestado con un mayor uso de vegetación en la zona urbana, ya que los espacios verdes hacen disminuir la intensidad de la islas de calor, no enfriando el aire pero sí haciendo que se caliente menos⁹. La vegetación, por un lado, reduce la temperatura del aire como consecuencia directa de la sombra provocada por los árboles, al igual que ocurre con los edificios, y por otro, la evapotranspiración transforma la radiación solar directa, en calor latente.

Por su parte, cuanto mayor sea el número de habitantes de una ciudad, mayor será la intensidad de su isla de calor. Según Oke¹⁰, la diferencia térmica entre la temperatura del interior de una ciudad y la temperatura de una zona rural próxima, T_{ur} , está relacionada con la población de dicha ciudad (P) de forma logarítmica,

$$T_{ur} = 3,06 \text{ Log } P - 6,79.$$

Las condiciones meteorológicas son fundamentales en la intensidad que puede adquirir la isla de calor. La variable meteorológica más influyente es el viento, de manera que existe una velocidad del viento para la cual el fenómeno desaparece¹⁰. Esa velocidad crítica está relacionada con la población de la ciudad por medio de la expresión, $V_{critica} = 3,4 \text{ Log } P - 11,6$. Las situaciones meteorológicas estables, con poco viento, sin precipitación y cielos despejados producen un aumento en la intensidad de la isla de calor. Sin embargo, con situaciones meteorológicas adversas la isla puede llegar a desaparecer⁸.

La isla de calor ha sido descrita por numerosos autores como un "efecto invernadero local"¹. La actividad industrial, los vehículos, las calefacciones y otras actividades humanas convierten las zonas urbanas en productoras de calor.

Con este trabajo se pretende dar a conocer el efecto que puede tener en el clima una zona urbana de tipo medio, en lo que a territorio y población se refiere, observando su evolución temporal y estableciendo un orden de magnitud para su intensidad.

2. METODOLOGÍA Y DATOS

El fenómeno que se trata en este trabajo es el calentamiento urbano, que está cuantificado por una variable denominada intensidad de la isla de calor, definida como la diferencia de temperatura entre el medio urbano (T_u) y el medio rural (T_r),

$$I = \Delta T_{ur} = T_u - T_r \text{ (}^\circ\text{C)}$$

En consecuencia, para su determinación es necesario disponer de datos de temperatura de estaciones meteorológicas urbanas y rurales.

2.1. Los datos

- **Datos del observatorio rural**, provienen del observatorio meteorológico de Matacán. Considerado medio rural ya que está suficientemente alejado de la ciudad (16 km), y emplazado en la margen izquierda del río Tormes, en una zona dedicada a la agricultura, especialmente al regadío. De esta estación se utilizarán datos de temperatura obtenidos a las 00.00, 07.00, 13.00 y 18.00 horas TU, así como los datos de temperaturas extremas.

- **Datos del observatorio urbano**: Estación E1, perteneciente a la Red de Vigilancia y Control de la Contaminación Atmosférica de Castilla y León. Esta estación está ubicada en uno de los puntos de más alta contaminación, en pleno casco urbano, en el cruce de dos grandes avenidas de la ciudad de Salamanca, Paseo de Torres Villarroel y Avenida de Portugal. Es una zona caracterizada por mucho tráfico y gran densidad de edificación. Los datos de estas estaciones son quinceminutales, con lo que para poder hacer un estudio comparativo con la zona rural, seleccionaremos los obtenidos a las 00.00, 07.00, 13.00 y 18.00 horas TU, y se calcularán los valores extremos obtenidos cada día.

2.2. Metodología

En cuanto a la metodología, como el estudio consiste en calcular la intensidad de la isla determinando la dife-

rencia de temperatura entre el medio urbano y el rural, la principal variable va a ser la temperatura (°C). El propósito es determinar la evolución temporal de la intensidad de la isla de calor, para lo cual, en este trabajo, se opta por el método de comparación de series de datos obtenidos en observatorios situados en puntos de diferentes características morfológicas¹¹.

- En primer lugar se analiza la **evolución diaria** de la isla de calor durante el año 1996. Debido a que las condiciones iniciales que determinan la existencia del fenómeno son diferentes, se ha dividido el estudio en horas diurnas, utilizando las temperaturas máximas, así como las registradas a las 13.00 h TU y a las 18.00 h TU, y las horas nocturnas, utilizando las temperaturas mínimas, así como las temperaturas registradas a las 00.00 h TU y a las 07.00 h TU.

- A continuación, se hace un **estudio estacional**, calculando los valores medios y extremos de la intensidad de la isla de calor. El análisis se hace para períodos estacionales, considerados éstos definidos como: invierno (diciembre, enero y febrero), primavera (marzo, abril y mayo), verano (junio, julio y agosto) y otoño (septiembre, octubre y noviembre). Para este estudio se utilizan los datos registrados durante los años 1996, 1997 y 1998.

- Finalizaremos el trabajo concretando los **valores anuales** del fenómeno isla de calor, con el fin de establecer el margen de intensidad que puede presentar la isla de calor en la ciudad de Salamanca. En este caso se utilizan los datos registrados durante los años 1996, 1997 y 1998.

3. RESULTADOS

3.1. Evolución diaria

Se calcula la intensidad de la isla de calor por diferencia entre la serie de datos de temperatura de la estación urbana (E1) y la rural (Matacán). La intensidad de la isla de calor a la hora en que se registran las temperaturas máximas se designa por $I_{máx} = T_{umáx} - T_{rmáx}$, y la calculada a partir de las temperaturas mínimas por $I_{mín} = T_{umín} - T_{rmín}$.

Dividimos el día en dos intervalos:

a) Horas diurnas, que incluyen las 13.00 h T.U., las 18.00 h T.U. y la hora a la que se registran las temperaturas máximas ($T_{máx}$).

Tabla 1.- Valores medios y extremos de la isla de calor diurna (°C), de 1996.

Hora (T.U.)	13.00	18.00	Tmáx
Media	-0.1	-0.3	-0.9
Máxima	2.7	5.7	6.5
Mínima	-3.7	-4.8	-9.9

Llama la atención el hecho de que los valores medios de la intensidad de la isla de calor, a horas diurnas, sean negativos. Es decir, que el calentamiento en la zona rural supera al calentamiento en la zona urbana. Este hecho se conoce como inversión de la isla de calor. La explicación de esta inversión la podemos encontrar analizando las causas que provocan la isla:

La contaminación y el calentamiento urbano.

Debido a que, por lo general, los focos de contaminación, tanto física como química se localizan dentro del perímetro urbano, debe ser esta zona la que sufra sus consecuencias, lo que, en principio, nos indicaría que el calentamiento provocado por la contaminación debe centrarse en la ciudad.

La estructura urbana.

Al realizar un estudio térmico a horas diurnas hay que tener en cuenta la presencia de radiación solar, que, en principio, tiene menor número de obstáculos para alcanzar la superficie terrestre en zona rural que en zona urbana, debido a la presencia de los edificios. Así, la radia-

ción solar puede hacer que suba más la temperatura en el campo abierto que la ciudad.

Las condiciones meteorológicas.

Si tenemos en cuenta que las horas diurnas son, normalmente, las horas de mayor inestabilidad, la velocidad del viento será mayor, y teóricamente disminuiría la intensidad de la isla. Sin embargo esto sucedería tanto en la zona urbana como en la rural.

Todo esto nos lleva a considerar la morfología urbana como el factor más influyente en la variación negativa de la isla de calor urbana. Por su parte, debemos tener en cuenta que a la hora a la que se registran las temperaturas máximas también se alcanzan las mayores inversiones de la isla de calor. Es por esto que, a partir de ahora, se considerará $I_{máx}$ como la representativa del fenómeno inversión de la isla de calor.

b) Horas nocturnas, en las que incluiremos las 00.00 h T.U., las 07.00 h T.U. y la hora a la que se registran las mínimas ($T_{mín}$).

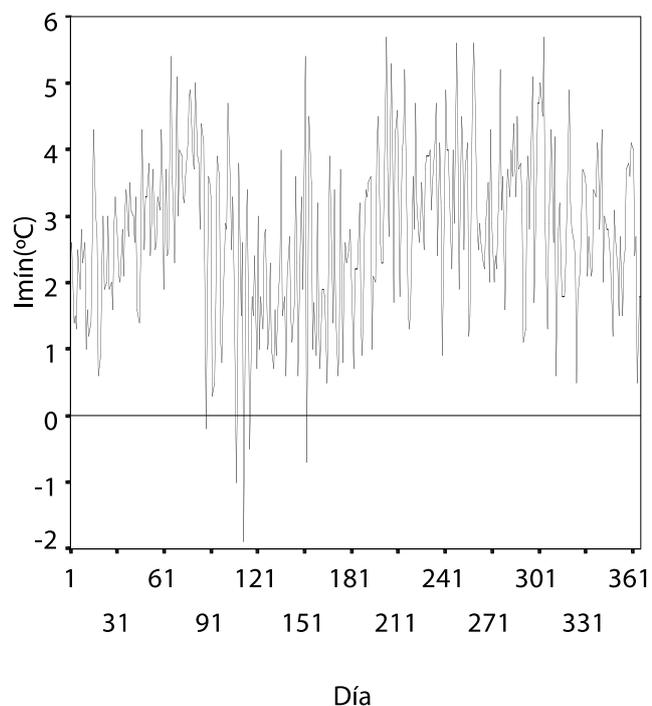
Tabla 2.- Valores medios y extremos de la isla de calor nocturna (°C), de 1996.

Hora (T.U.)	00.00	07.00	Tmín
Media	1.3	1.6	1.9
Máxima	6.5	5.9	7.9
Mínima	-4.2	-3.3	-4.6

La Tabla 2 nos muestra valores positivos en la intensidad media de la isla de calor, es decir, la temperatura medida dentro del recinto urbano es mayor que la que se da, simultáneamente, en la zona rural.

Aunque las tres causas, antes mencionadas, como causantes de la alteración microclimática que sufre una ciudad, influyen en la isla de calor nocturna, la morfología urbana debe considerarse como la principal. Cuando la radiación solar incide sobre los materiales que forman el entorno rural, gran parte es reflejada, mientras que al incidir sobre los materiales propios de la zona urbana, es absorbida, para ser emitida, posteriormente, y de forma lenta, como radiación de onda larga. Así, por la noche la zona rural se ha deshecho de toda la energía que, durante el día, ha llegado a su superficie, mientras que, la ciudad continúa emitiendo energía, y por tanto, calentando las capas atmosféricas más bajas.

Figura 1.- Evolución a lo largo del año de $I_{m\acute{a}x}$ (°C) media de 1996, 1997 y 1998.

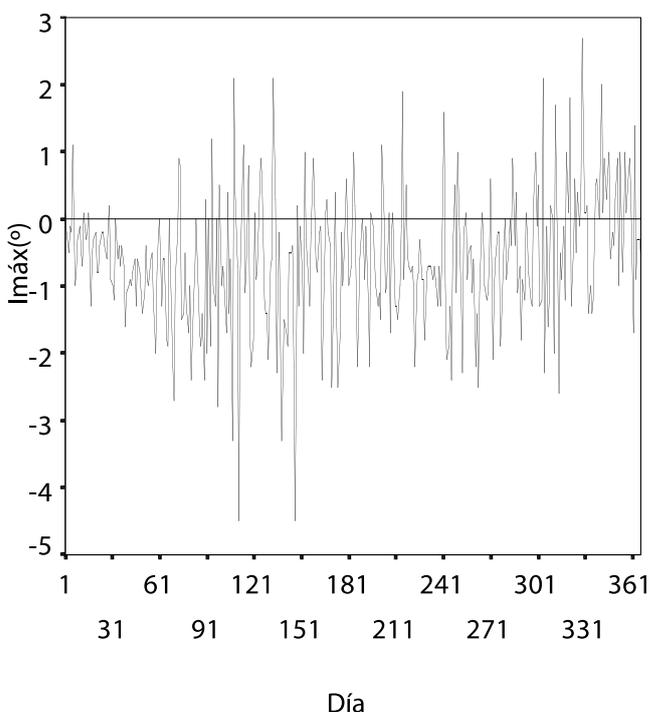


Como se puede observar en la Tabla 2, a horas nocturnas la isla calculada con las temperaturas mínimas obtiene los valores medios más altos, por lo que consideraremos $I_{m\acute{a}x}$ como representativa del fenómeno isla de calor nocturna.

Con el fin de poner de manifiesto los calentamientos diurnos y nocturnos de forma más clara, calculamos el valor medio de $I_{m\acute{a}x}$ e $I_{m\acute{i}n}$, día a día, entre los años 1996, 1997 y 1998, y representamos gráficamente.

En las Figuras 1 y 2 se han representado las intensidades de la isla de calor a horas diurnas y a horas nocturnas, respectivamente. Mostrando el origen como referencia, se puede comprobar cómo a horas diurnas predomina el calentamiento rural, es decir, los valores negativos de la variable $I_{m\acute{a}x}$, y a horas nocturnas apenas existe inversión de la isla de calor, quedando restringida a los meses de primavera, que es la época en la que llega a tierra más radiación solar y durante más tiempo.

Figura 2.- Evolución a lo largo del año de $I_{m\acute{i}n}$ (°C) media de 1996, 1997 y 1998.



3.2. Evolución estacional

En la Tabla 3 se muestran los valores medios y extremos de $I_{m\acute{a}x}$ y de $I_{m\acute{i}n}$, por períodos estacionales, definidos según lo explicado en el capítulo de metodología.

Tabla 3.- Valores medios y extremos de $I_{m\acute{a}x}$ (°C) e $I_{m\acute{i}n}$ (°C) por estaciones.

	$I_{m\acute{a}x}$ (°C)			$I_{m\acute{i}n}$ (°C)		
	Valor medio	Máximo	Mínimo	Valor medio	Máximo	Mínimo
Invierno	-0.5	4.1	-3.8	2.3	6.6	-0.7
Primavera	-0.9	6.2	-9.9	2.5	9.3	-6.6
Verano	-0.7	5.3	-4.7	2.7	7.8	-2.1
Otoño	-0.5	6.5	-9.7	3.2	7.8	-3.4

Como puede observarse, los valores medios de $I_{m\acute{a}x}$ son negativos en todas las estaciones del año, alcanzando el valor medio más alto en la primavera y en verano, lo que se justifica teniendo en cuenta que es la época del año en la que llega más radiación solar al suelo.

La isla de calor nocturna alcanza su valor medio más alto en el otoño, lo que se puede explicar considerando que, en el caso de Salamanca y para los tres años estudiados, es la época de menor velocidad del viento que, como

se ha visto en la introducción, es uno de los factores más influyentes en el fenómeno de calentamiento urbano.

3.3. Evolución anual.

Con el fin de estimar el valor que alcanza la isla de calor y su inversión, en Salamanca, calculamos los valores medios y extremos de $I_{m\acute{a}x}$ e $I_{m\acute{i}n}$, para los años 1996, 1997 y 1998. Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4.- Valores medios y extremos anuales, de $I_{m\acute{a}x}$ e $I_{m\acute{i}n}$, para 1996, 1997 y 1998

Año	I _{máx}			I _{mín}		
	1996	1997	1998	1996	1997	1998
Valor medio	-0.9	-0.9	-0.1	1.9	2.9	3.6
Máximo	6.5	1.4	5.9	7.9	7.8	9.3
Mínimo	-9.9	-3.8	-5.5	-6.6	-0.6	-3.4

Los valores medios anuales indican que las inversiones de la isla diurna son pequeñas, y permanecen por debajo de -1.0 °C. Por su parte, las intensidades medias positivas de la isla nocturna se sitúan entre los 1.9 °C y los 3.6 °C.

4. CONCLUSIONES

1.- Se ha probado la **existencia de la isla de calor urbana** en la ciudad de Salamanca.

2.- La **evolución diaria** de la isla de calor muestra dos situaciones claramente diferenciadas:

Isla de calor diurna, que representa un mayor calentamiento de la zona rural que de la zona urbana, a lo que se denomina inversión de la isla de calor. La variable que cuantifica el fenómeno de forma más clara es la intensidad de la isla de calor calculada con las temperaturas máximas.

Isla de calor nocturna, que presenta valores de intensidad media positiva, tomando como variable más representativa la intensidad de la isla calculada con las temperaturas mínimas.

3.-Evolución estacional.

El valor medio más alto de la inversión de la isla de calor se da en la primavera, época en la que la llegada de mayor cantidad de radiación solar provoca un mayor calentamiento de la zona rural, debido a que está despejada de edificios que le hacen sombra.

El valor medio más alto de la intensidad de la isla de calor nocturna se da en otoño, a lo que se ha dado explicación con las condiciones meteorológicas, ya que, para los años estudiados, es la época en la que la velocidad media del viento es menor.

4.-La **evolución anual** nos ha permitido establecer el siguiente rango de intensidades, que definen la isla de calor en la ciudad de Salamanca:

- **Isla de calor débil**, si su intensidad es inferior a los 2.0 °C

- **Isla de calor moderada**, si su intensidad presenta valores entre 2 °C y 4 °C.

- **Isla de calor intensa**, si ésta supera los 4.0 °C.

5. BIBLIOGRAFÍA

- 1.-López G. El clima urbano en Madrid: La isla de calor. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas; 1991.
- 2.-Smoyer K, Kalstein L, Greene J, Ye H. The impacts of weather and pollution on human mortality in Birmingham, Alabama and Philadelphia, Pennsylvania. *International Journal of Climatology* 2000; 20:881-897.
- 3.-Kalkstein LS, Davis RE. Weather and human mortality: An evaluation of demographic and interregional responses in the United States. *Annals of the Association of American Geographers* 1989; 79(1):44-64.
- 4.-Kalkstein LS. Health and climate change-direct impacts in cities. *The Lancet* 1993; 342:1397-1399.
- 5.-Alderson MR. Season and mortality. *Healths Trends* 1985; 17:87-96.
- 6.-Thurston GD. A critical review of PM10-mortality time series studies. *Journal of Exposure and Analytic Environmental Epidemiology* 1996; 6:3-21.
- 7.-Shumway RH, Azari AS, Pawitan Y. Modeling mortality fluctuations in Los Angeles as functions of pollution and weather effects. *Environmental Research* 1988; 45:224-241.
- 8.-Alonso MS, Labajo JL, Fidalgo MR. Estudio de la isla de calor urbana en Salamanca. Salamanca: Series resúmenes de Grados de Salamanca, Universidad de Salamanca; 1999.
- 9.-Dinoudi A, Nikolopoulou M. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings* 2003; 35: 69-76.
- 10.-Oke TR, Hannel FG. The form of the urban heat island in Hamilton, Canada. *WMO Tech. Note* 1970; 108: 113-126.
- 11.-Figuerola MR, Mazzeo N. Urban-Rural temperatures differences in Buenos Aires. *International Journal of Climatology* 1998; 18:1709-1723.