Revista de Climatología

Vol. 11 (2011): 1-10 ISSN 1578-8768

©Copyright de los autores de cada artículo. Se permite su reproducción y difusión por cualquier medio, siempre que se haga sin interés económico y respetando su integridad

Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México.

Sonia Romero Dávila[1], Carlos Constantino Morales Méndez[2] y Xanat Antonio Némiga[2]

[1] *Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México (sonia_romero1@hotmail.com)*
[2] *Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México*

(Recibido: 17-Jun-2010. Publicado: 11-Ene-2011)

Resumen

En los últimos años se presentan diversas alteraciones en torno a la variabilidad del clima en el planeta. Una de las causas es el crecimiento demográfico que se ha establecido y concentrado en las ciudades, lo cual ha tenido manifestaciones en el clima urbano como es el de la ciudad de Toluca, donde se identifican diversos factores que propician un incremento en la temperatura principalmente en la zona centro de la ciudad. El objetivo de esta investigación fue identificar las islas de calor de verano e invierno mediante datos atmosféricos para conocer con condiciones atmosféricas ideales, su distribución espacial en la ciudad de Toluca. Para ello se ubicaron nueve estaciones durante un día característico del verano y otro de invierno, en las que se recopiló información meteorológica en campo de la temperatura cada 15 minutos; considerando las condiciones atmosféricas de cielo despejado, velocidad del viento menor a 2 m/s, estabilidad atmosférica y que las diferencias de altitud no rebasaran los 100 metros, para evitar el efecto del gradiente térmico vertical. Se identificó una isla de calor de verano e invierno, cuya ubicación corresponde al área de mayor infraestructura urbana y se dispone claramente hacia el centro de la ciudad, donde se ubica el mayor número de edificios y construcciones con materiales que absorben el calor, así como una gran concentración de vehículos; caracterizada por la falta de vegetación y la escasez de cuerpos de agua. La diferencia térmica en el verano e invierno tanto en el día como en la noche oscila entre 4,0°C y 5,0°C.
Palabras clave: Clima urbano, isla de calor, Toluca.

Abstract

In recent years, several changes occur around climate variability on the planet. One reason is population growth, which has been established and concentrated in cities that have had manifestations in the urban environment as in the city of Toluca, which identifies several factors that lead to temperature increase mainly in the downtown area. The objective of this research was to identify the heat island in summer and winter using atmospheric data, to know its spatial distribution in the city of Toluca in ideal weather conditions. For this, nine measurement stations were located during two typical days, one in summer and another in winter. Weather stations collected field temperature data every 15 minutes, considering weather conditions of clear skies, wind speed below 2 m/s, atmospheric stability and height differences less than 100 m to avoid the effect of vertical temperature gradient. We found a heat island in summer and winter, whose location is the largest area of urban infrastructure and installed clearly towards the city center. Numerous buildings and structures made of materials that absorb heat are located there; this area has a high concentration of vehicles, and is characterized by the lack of vegetation and water bodies. The calculated temperature difference between daytime and nighttime measurements for summer and winter ranges from 4,0°C to 5,0°C.
Key words: *Urban climate, heat island, Toluca.*

1. Introducción

Las ciudades constituyen el hábitat por excelencia para los seres humanos, y pese a su diversidad presentan características ambientales comunes en muchas partes del mundo. La ciudad es el ejemplo más representativo de las modificaciones que el hombre es capaz de introducir en el medio; modifica las condiciones climáticas y ambientales, elevando la temperatura y afectando al régimen de precipitaciones

y de vientos, entre otros (Gómez, 2005). A fines del siglo XIX, Luke Howard ya hablaba del clima de las ciudades. En 1818 descubrió que la ciudad se presenta más caliente que el campo, tras registrar las temperaturas medias mensuales entre el centro de la ciudad y el área rural. De este modo, comprobó la existencia de una isla de calor que atribuyó al uso intensivo de los combustibles de la época: carbón y leña (Capelli *et al.*, 2005). Con los estudios que realizó, propuso que las zonas urbanas debían estructurarse de tal manera que sus trazas quedaran separadas por zonas de campo. Esta propuesta inicial no se refería a contener el crecimiento de las zonas urbanas, sino solamente a garantizar "espacio para respirar" (Weng y Yang, 2004).

Las zonas urbanas son más cálidas, en general, que el campo y el fenómeno recibió la expresión denominada "isla de calor", que utilizó Manley por vez primera en 1958 ("the urban heat island") y hoy en día es un término conocido internacionalmente. La presencia de la Isla de Calor, que corresponde a un aumento de origen antrópico de las temperaturas de la ciudad en comparación con su entorno inmediato de carácter natural y rural, se ha documentado sistemáticamente en diversas ciudades del mundo (Capelli *et al.*, 2005), pues las condiciones de crecimiento urbano son significativamente diferentes a las condiciones rurales. El paisaje urbano está significativamente caracterizado por el pavimento y los edificios. Esto modifica el clima urbano, de tal manera que disminuye la velocidad del viento, eleva las temperaturas, aumenta la precipitación, baja la humedad relativa y aumenta la cantidad de contaminantes, en relación con el medio rural (Flint, 1985; Harris, 1992). La extensión de estas influencias depende del tamaño de la ciudad y la cantidad de vegetación.

Existen factores que favorecen la formación de una isla de calor, tales como: las superficies de las ciudades son impermeables, con rápida escorrentía y espacios verdes reducidos, y es por ello que la evapotranspiración también es menor; por otro lado, los automóviles, la calefacción, la industria, etc (Oke, 1987; López, 1993). La isla de calor se forma cuando el aire caliente tiende a acumularse en el centro de la ciudad, debido a la concentración de edificios y de calles pavimentadas. Este aire caliente se eleva, arrastrando consigo la carga de contaminación; luego se expande hacia los bordes de la ciudad, y se enfría. De este modo, en los bordes de la ciudad el aire más frío fluye de nuevo hacia el centro, cerca de la superficie del suelo, formando así un sistema circulatorio autocontenido, que sólo se podrá alterar o romper por el efecto de un viento fuerte (Kenneth y Warner, 2004).

La absorción de calor por la masa de las edificaciones durante el día y su lenta irradiación durante la noche determina que se forme una isla nocturna de calor, rodeada por un medio rural más fresco. A ello contribuyen los emisores térmicos locales: vehículos, calefacciones, etc. En las noches de calma las diferencias con el campo próximo pueden llegar hasta los 10,0°C. Esta diferencia entre el medio urbano y rural radica en la estructura de sus superficies. En términos cuantitativos, las áreas naturales o agrícolas se caracterizan por vegetación y suelo poco compactado y permeable; sin embargo, el área urbana posee superficies altamente compactadas e impermeables, contrariamente a lo que ocurre en los bosques o en el campo, donde hasta el 60 ó 70 % de la radiación recibida se captura y se aprovecha en la evaporación. En la ciudad, los edificios y el asfalto pueden irradiar hasta el 90 % de la energía calorífica que reciben y lo hacen como radiación infrarroja. La ciudad tiene condiciones de confort diferentes a las del área circundante y estas causas se deben precisamente a la acción del hombre (Gómez, 2005).

En cuanto a la estacionalidad de la isla de calor, no existe determinación de que sea más intensa en verano o en invierno. Algunos autores señalan que es más intensa en verano (Eliasson, 1994; Klysik y Fortuniak, 1999; Kolokotroni y Giridharan, 2008), y otros mencionan que lo es en invierno (Moreno, 1994; Montávez *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2007) e incluso otoño (Alonso *et al.*, 2003). Es muy difícil alcanzar un acuerdo global respecto a la estacionalidad de la máxima intensidad de la isla de calor, ya que ésta dependerá de las condiciones propias de la localización geográfica, del emplazamiento de la ciudad, su entorno y su climatología (Sarricolea *et al.*, 2008).

Por ello, el objetivo de este trabajo es identificar las islas de calor de verano e invierno mediante datos atmosféricos, para conocer su distribución espacial en la ciudad de Toluca.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

La traza de la ciudad de Toluca se encuentra ubicada entre los 2600 y 2700 msnm y está rodeada por la Sierra de las Cruces, que separa los valles de Toluca y México, en la región identificada como Curso Alto del Río Lerma. Topográficamente es una zona plana, ya que presenta un desnivel de 130 m de Oeste a Este. Su clima es templado con régimen de lluvias en verano y un porcentaje de precipitación en invierno inferior al 10 %. La oscilación térmica anual es inferior a 5,0°C y la temperatura más elevada ocurre antes del solsticio de verano. Según la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García, la simbología climática que corresponde a Toluca es: C(w_1)(w)big. Toluca es una ciudad que ha sufrido un crecimiento considerable en los últimos años, consecuencia de diferentes factores antrópicos que han contribuido a la formación de islas de calor dentro de la ciudad. Estudios realizados con anterioridad demuestran la formación de islas de calor tanto en el verano como el invierno (Morales *et al.*, 2007).

La temperatura en el verano aumenta en el día, pues los días son más largos y las noches más cortas. La temperatura media en Toluca y su zona metropolitana en verano (junio, julio y agosto) va de los 5,0°C a los 18,0°C. Sin embargo, la temperatura varía considerablemente en pocos metros, y la isla de calor se concentra en donde existe mayor actividad humana. Por su parte, la temperatura durante el invierno desciende por las tardes, descenso debido a los vientos del norte, masas de aire polar frío provenientes de las altas presiones del sur de Canadá que se desplazan hacia el mar de las Antillas formando los llamados "nortes" (Hernández, 2002).

2.2. Mediciones de temperatura

Para identificar las islas de calor se recopilaron datos de información meteorológica en campo, especialmente de la temperatura ambiente. Para ello, se establecieron nueve estaciones durante un día característico del verano (29 de Julio) del año 2009 y otro de invierno (7 de febrero) del año 2010, en las que se utilizaron termómetros Six de mercurio (de máximas y mínimas) con los que se midió y registró, la temperatura cada 15 minutos (Sarricolea *et al.*, 2008). Considerando las normas de la Organización Meteorológica Mundial, éstos se colocaron a metro y medio en relación con el piso y a la sombra. Además, antes del registro de datos y para obtener lecturas más confiables, los termómetros se calibraron, para lo cual se colocaron a metro y medio del piso sujetos a una pared sombreada, dejándolos ambientar una hora y registrando simultáneamente sus lecturas, anotando las variaciones entre ellos para posteriormente igualar las temperaturas. Durante esta calibración, tres termómetros definieron el valor patrón, que en este caso corresponde con los números 1, 5 y 7 que marcan 20,0°C (tabla 1); de acuerdo con este valor se les aumentó o disminuyó a los otros termómetros según correspondiera.

Tabla 1: Temperaturas de la calibración de los termómetros y correcciones a aplicar.

Termómetro	Temperatura (°C)	Corrección (°C)
1	20,0	0,0
2	19,0	+1,0
3	20,5	-0,5
4	19,5	+0,5
5	20,0	0,0
6	19,0	+1,0
7	20,0	0,0
8	21,0	-1,0
9	20,5	-0,5

Figura 1: Ejemplo de sitio urbano: Instalación del equipo en el zócalo de Toluca (29 de julio de 2009).

Figura 2: Ejemplo de sitio suburbano: Instalación del equipo en Zinacantepec (29 de julio de 2009).

El día seleccionado con las características meteorológicas ideales, se procedió a instalar los instrumentos (figuras 1 y 2) para llevar a cabo las mediciones, procurando mantenerlos a la sombra. La figura 1 muestra la instalación del equipo en un sitio urbano y la figura 2 en sitio suburbano, lugares donde se tomaron las lecturas. Las condiciones atmosféricas consideradas para elegir el día ideal para llevar a cabo las mediciones fueron cielo despejado, velocidad del viento inferior a dos metros por segundo y con estabilidad atmosférica (Morales *et al.*, 2007), lo que obligó a monitorear el estado del tiempo mediante las imágenes de satélite que proporciona el Servicio Meteorológico Nacional y el informe diario del tiempo atmosférico que emite el Observatorio Meteorológico "Mariano Barcena" de Toluca.

Las mediciones se llevaron a cabo de las 10:00 a las 13:00, ya que en este horario las condiciones meteorológicas generalmente son más estables en relación con otras horas del día, mientras que en la noche se registró la temperatura entre las 22:00 horas y la 01:00 de la mañana, porque corresponden al horario con temperaturas relativamente frías del horario nocturno, y son las opuestas en relación al horario del día.

Los sitios de medición se ubicaron entre 2 y 8 kilómetros de distancia, partiendo del centro de la ciudad hacia la periferia, y se encuentran entre zonas urbanas y espacios suburbanos (figura 3).

En estos sitios se registró la ubicación geográfica (latitud, longitud y altitud), mediante un navegador GPS, así como los rasgos geográficos que se encuentran alrededor para realizar la interpretación atmosférica. Por otro lado, se hizo la representación de las elevaciones para identificar la distribución del relieve mediante las curvas de nivel. Adicionalmente se tuvo especial cuidado con que las diferencias de altitud entre los sitios de registro no excedieran los 100 metros, para evitar el efecto del gradiente térmico vertical (-0,6°C por cada 100 metros de altitud).

Con los registros de temperatura se elaboró una base de datos y se graficaron los registros de temperatura sobre la traza urbana de la ciudad para generar cartografía de la temperatura diurna y nocturna de la ciudad en verano e invierno, mediante interpolación manual. Estos mapas fueron posteriormente referidos espacialmente en el Software ArcView® 3.2, donde también se cuantifica la extensión de las islas de calor de verano e invierno.

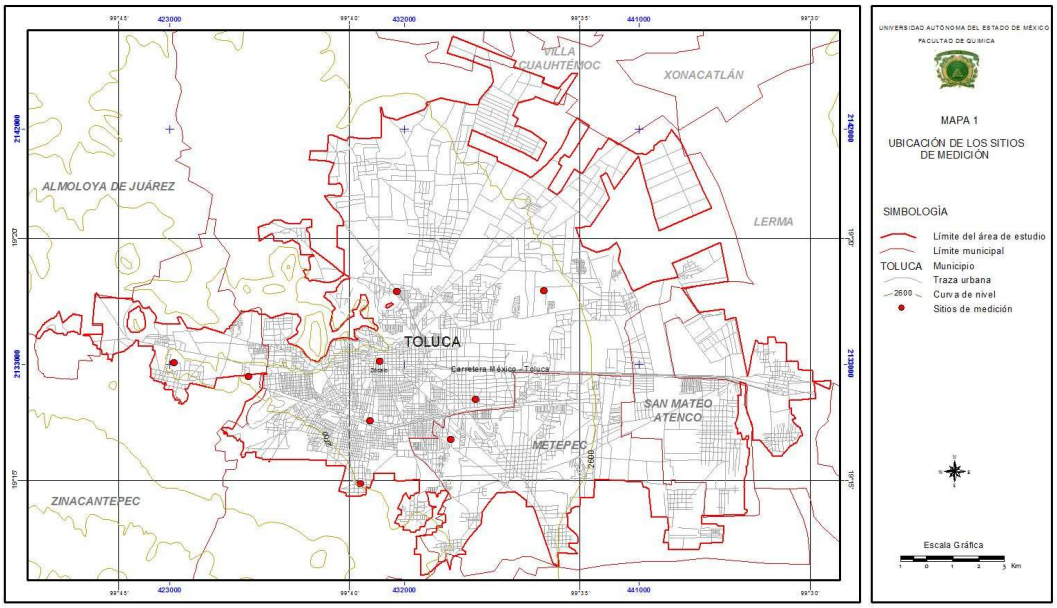

Figura 3: Ubicación de los sitios de medición

Asimismo, con estos registros se construyeron las gráficas de temperatura ambiente por hora en días característicos del verano e invierno, para entender los momentos del día en que ocurren las temperaturas máximas y mínimas en estas dos estaciones. Esta información se interpreta para dar contexto a los resultados aquí mostrados.

3. Resultados

Con las lecturas de temperatura de la mañana se realizó el mapa de temperaturas diurnas del verano (figura 4), en el cual se identifican los registros más elevados en la zona centro de la ciudad, y los menores se observan hacia las partes menos urbanizadas ubicadas hacia el Este y Oeste de la cuidad. El rango de temperatura del día en verano, entre la zona urbana y la periferia, oscila entre los 16,0°C y los 21,0°C, es decir, hay una diferencia térmica de 5,0°C. La isla de calor diurna del verano presenta una forma irregular la cual se localiza en la parte Norte entre las calles de Matlatzincas y Texcoco y se extiende al Sur hasta las calles de Ramón Corona y Francisco Murguía, al Oeste alcanza hasta la calle denominada General Agustín Millán, hacia el Suroeste se delimita con El Calvario (este sitio es uno de los pocos con presencia de vegetación considerable dentro de la ciudad), la parte Este se extiende hasta las calles de Alejandro Von Humbolt y Plan de Ayutla y se encuentra a una altitud entre los 2660 y 2700 msnm. En total esta isla de calor abarca una extensión de 1,75 km^2.

Durante la noche las temperaturas tienen un comportamiento similar, presentándose las temperaturas más elevadas en el centro y las menores en la periferia. Las temperaturas nocturnas en verano de la zona urbana y la periferia oscilan desde los 11,0°C hasta los 16,0°C, presentándose la misma diferencia térmica del día, es decir, 5,0°C.

La isla de calor nocturna del verano esta limitada al Norte por la calle de Gómez Pedraza, al Sur entre las calles de Hidalgo y Morelos, al Este alcanza hasta la calle de Rayón, hacia el Oeste se encuentra delimitada por la calle de Pedro Ascencio. La altitud a la que se encuentra ubicada es de 2660 a 2670 msnm y tiene una extensión de 0,29 km^2.

Para conocer el comportamiento de las temperaturas nocturnas se elaboró el mapa de temperaturas nocturnas del verano (figura 5) en el cual se identifica una pequeña isla de calor en la zona centro de la ciudad. En ciudades más grandes como es el caso de la ciudad de México, las variaciones entre el centro y la periferia son de hasta 8,0°C (Jáuregui, 2005).

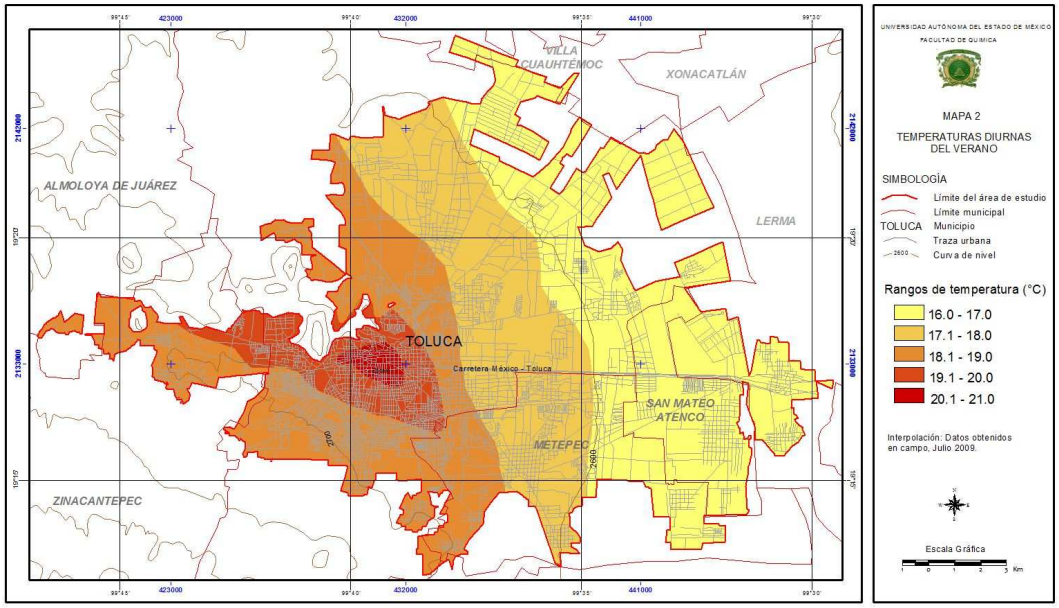

Figura 4: Temperaturas diurnas del verano

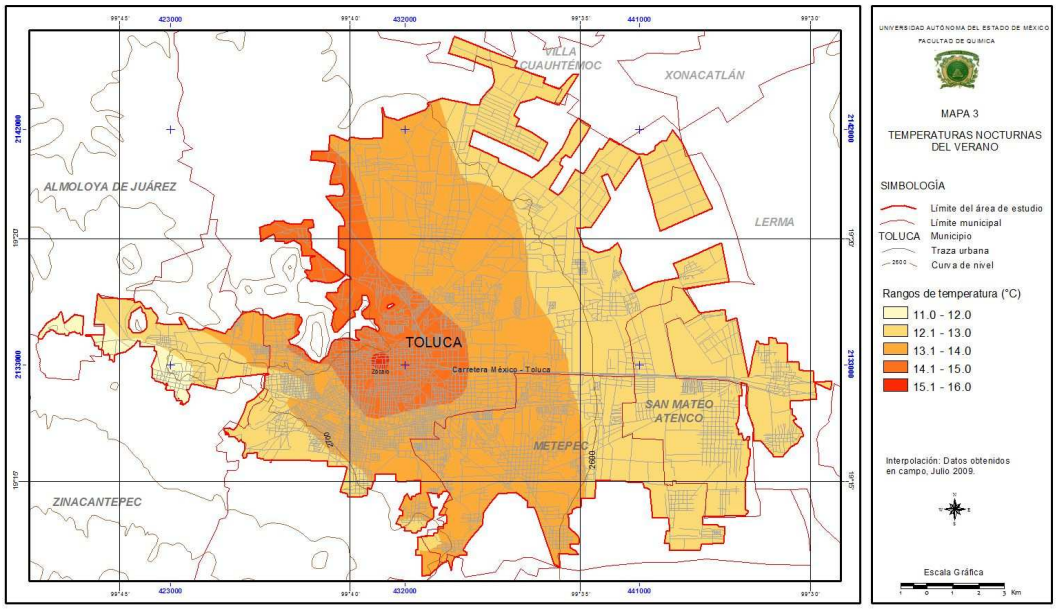

Figura 5: Temperaturas nocturnas del verano

La temperatura media en Toluca y el área metropolitana durante el invierno (diciembre, enero y febrero) fluctúa entre los 3,0°C y los 11,0°C, presentándose las temperaturas más bajas hacia el suroeste rumbo al volcán Nevado de Toluca, siendo este un lugar de mayor altitud.

Para analizar el comportamiento de la temperatura de invierno en la ciudad se elaboró el mapa de temperaturas diurnas del invierno (figura 6) en el cual se observa claramente la distribución espacial de la isla de calor de invierno durante el día, la misma que corresponde a la zona centro de la ciudad. La temperatura del día en invierno, entre la zona urbana y la periferia, oscila entre los 12,0°C y los 17,0 °C, con una diferencia térmica de 5,0°C.

La isla de calor diurna del invierno presenta una forma irregular, la cual limita al Norte por la calle Texcoco, al Sur por la avenida Venusiano Carranza, del lado Este alcanza hasta la calle de 5 de Mayo y

hacia el Oeste hasta la calle denominada Laguna del Barril, y se sitúa a una altitud entre los 2660 y 2700 msnm abarcando una extensión de 3,54 km^2.

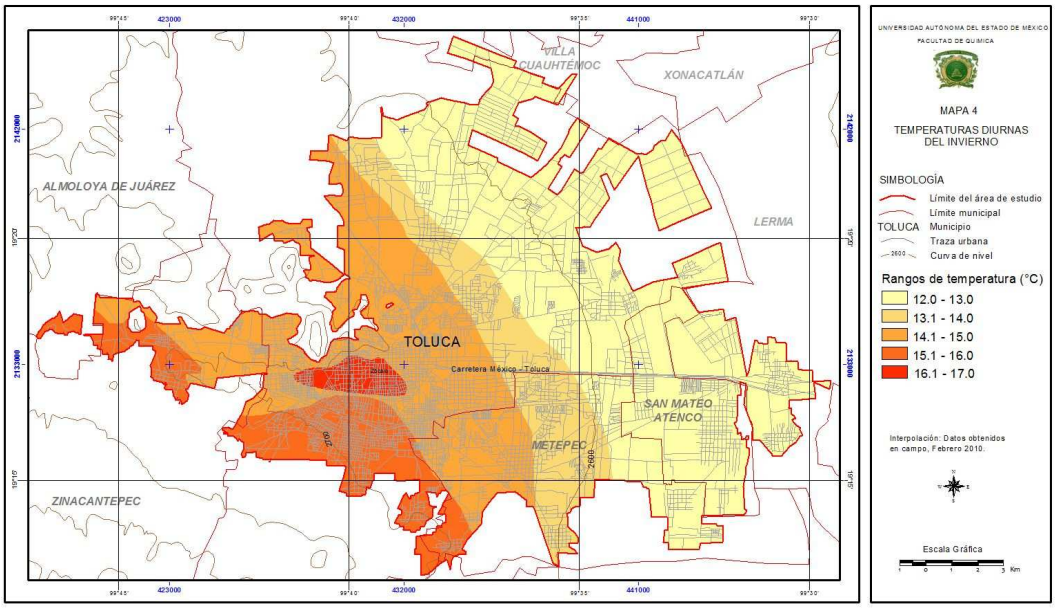

Figura 6: Temperaturas diurnas del invierno

La isla de calor nocturna de invierno, también corresponde con el centro de la ciudad (figura 7). La temperatura en la noche en invierno, entre la zona urbana y el área conurbana, oscila entre los 5,0°C y los 9,0°C, con una diferencia térmica de 4,0°C. La isla de calor nocturna del invierno está limitada al Norte entre las calles de Matlatzincas y Texcoco, al Sur por las calles de Francisco Murguía y Rafael M. Hidalgo, al Este entre la calle de Isidro Fabela y la antigua estación del tren, hacia el Suroeste también delimita con el área de vegetación llamada El Calvario, y al Oeste limita entre las calles de General Agustín Millan y Tianguistenco. Se encuentra entre los 2645 y 2680 msnm de altitud y tiene una extensión de 2,62 km^2.

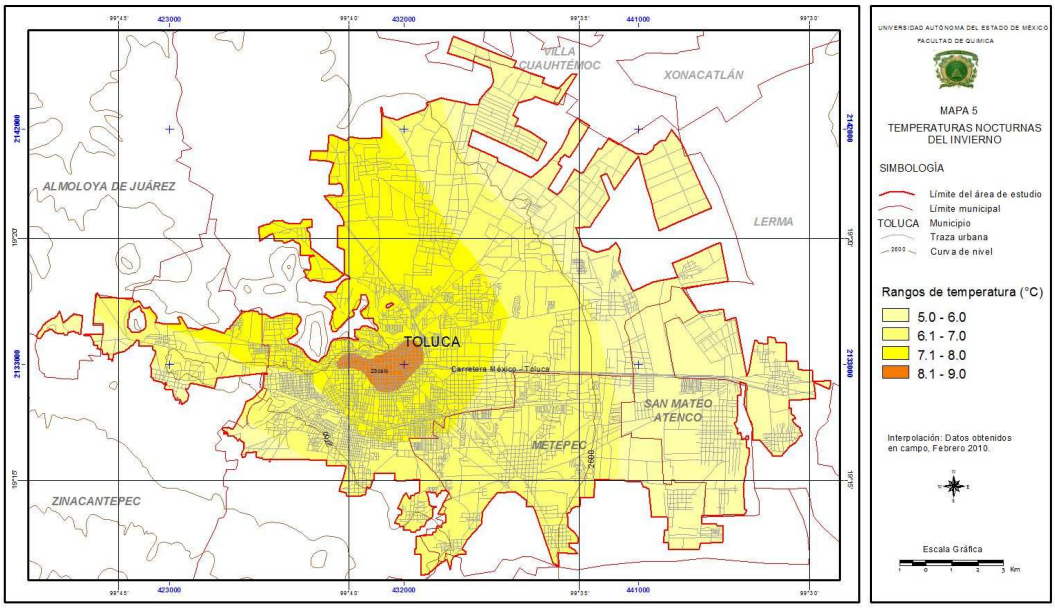

Figura 7: Temperaturas nocturnas del invierno

Las gráficas de temperatura ambiente (figuras 8 y 9) se realizaron para relacionar el comportamiento térmico durante cada hora de los días en que se midió (29 de julio de 2009 y el 7 de febrero de 2010) con la finalidad de observar las horas donde se presentan las temperaturas más frías y las más elevadas del día.

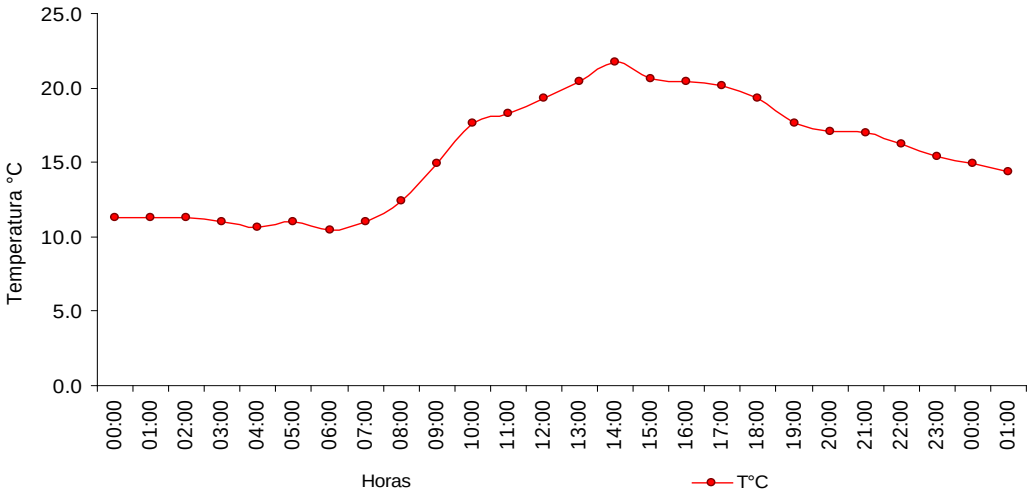

Figura 8: Temperatura ambiente de un día característico del verano

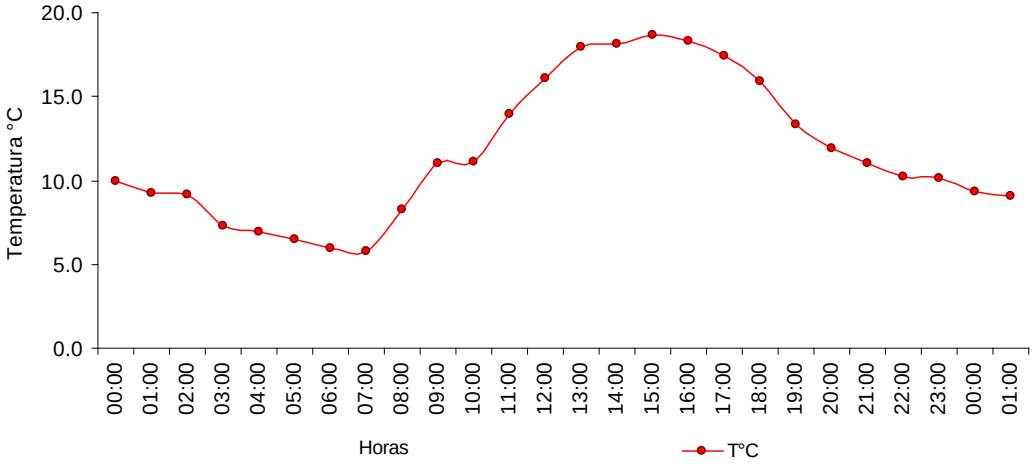

Figura 9: Temperatura ambiente de un día característico del invierno

Para la elaboración de estas gráficas a lo largo del día se tomó la temperatura de cada hora del Observatorio "Mariano Barcena", el cual se encuentra ubicado en el centro de la ciudad, y los aparatos meteorológicos están colocados en el edificio de Rectoría a 25 metros de altura, por lo que las temperaturas son relativamente más bajas que las distribuidas en la ciudad.

Como se aprecia en las gráficas, las temperaturas más bajas ocurren antes de salir el sol, es decir, alrededor de 6:00 de mañana en verano y las 7:00 en invierno; posteriormente van ascendiendo con la salida del sol presentándose las temperaturas más elevadas alrededor de las 14:00 en verano y a las 15:00 en invierno, a partir de esta hora se disminuye y se evidencia aún más después de la puesta del sol.

También se puede observar que las temperaturas más intensas se presentan de las 10:00 horas a las 15:00. Este incremento no está relacionado con la isla de calor, sino con el aumento de insolación en esas horas; sin embargo, en este lapso también el calor de los materiales urbanos se incrementa.

Por la tarde la temperatura comienza a descender, presentándose los valores más bajos entre las 4:00 y las 6:00 de la mañana en verano y entre las 5:00 y las 7:00 de la mañana en invierno.

De manera general las temperaturas tienen un comportamiento similar tanto en verano como en invierno a lo largo de las 24 horas de día, pero en invierno los valores son relativamente más bajos.

En síntesis, las islas de calor en Toluca presentan una variación térmica consistente e importante, cercana a los 5,0°C, y podrían estar vinculadas a las dinámicas de crecimiento y metropolización del municipio de Toluca.

4. Conclusiones

La identificación de la isla de calor del verano e invierno corresponde con el área de mayor infraestructura urbana y se identifica hacia el centro de la ciudad, donde se concentra el mayor número de edificios y construcciones con materiales (superficies de concreto y asfalto) que absorben el calor, así como la gran concentración de vehículos; otro factor importante es la escasez de vegetación y de cuerpos de agua.

La diferencia térmica registrada durante el verano, tanto diurna como nocturna es de 5,0°C, mientras que para el invierno durante el día es de 5,0°C y en la noche fue de 4,0 °C. Sin embargo, la isla de calor diurna, tanto en verano como en invierno, es mayor en proporción que la identificada durante la noche.

En términos generales, la isla de calor identificada en la ciudad de Toluca es de 5,0°C, lo cual es típico en una zona urbana de dimensiones medias.

El área mayor de la isla de calor, se presenta en el día durante el invierno, en tanto que la isla de calor con menor área se presenta durante la noche en el verano.

La isla de calor también se encuentra en la zona de solana de la ciudad; es decir, en el costado sur de la Sierra Morelos, donde durante el año incide más la radiación solar por su ubicación geográfica. Por tanto, es un área más caliente en relación con los espacios circunvecinos.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de México y la Universidad de California, Santa Cruz, como parte del proyecto titulado: “Factibilidad de una estrategia de uso de suelo para la mitigación del cambio climático en el altiplano mexicano” (Clave: CL08-09). También se agradece al CONACYT, por el apoyo de la beca de maestría en Ciencias Ambientales, en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México, otorgada a la alumna Sonia Romero Dávila.

Bibliografía

Alonso MS, Labajo JL and Fidalgo MR (2003): Characteristics of the urban heat island in the city of Salamanca, Spain. *Atmósfera*, 16:137-148.

Capelli A, Píccolo MC y Campo A (2005): *Clima urbano de Bahía Blanca*. Buenos Aires, Argentina, 197 pp.

Eliasson I (1994): Urban-suburban-rural air temperature differences related to street geometry. *Physical Geography*, 15:1-22.

Flint H (1985): Plants Showing Tolerance of Urban Stress. *Journal of Environmental Horticulture*, 3:85-89.

Gómez F (2005): Las zonas verdes como factor de calidad de vida en las ciudades. *Ciudad y territorio: Estudios territoriales* (Valencia, España), 144:417-436.

Harris R (1992): *Arboriculture: Integrated Management of Landscape Trees, Shrubs and Vines*. 2nd Edition. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, USA. 674 pp.

Hernández J (2002): *Contaminación atmosférica en la ciudad de Toluca*. UAEM. 159 pp.

Jáuregui E (2005): Possible impact of urbanization on the termal climate of some large cities in México. *Atmósfera*, 18:247-252.

Kenneth W y Warner CF (2004): *Contaminación del Aire y Control*. Ed. Limusa. México D.F., 650 pp.

Klysik K and Fortuniak K (1999): Temporal and spatial characteristics of urban heat island of Lòdz, Poland. *Atmospheric Environment*, 33:3885-3895.

Kolokotroni M and Giridharan R (2008): Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar Energy*, 82:986-998.

Liu W, Ji C, Zhong X, Jiang X and Zheng Z (2007): Temporal characteristics of the Beijing urban heat island. *Theor. Appl. Climatol.*, 87:213-221.

López A, Fernández F, Arroyo F, Martín-vide J y Cuadrat JM (1993): *El clima de las ciudades españolas*. Ed. Cátedra. Madrid. 268 pp.

Manley G (1958): On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quart. J. of Royal Meteor. Soc.*, 84:70-72.

Montávez JP, Rodríguez A and Jiménez JI (2000): A study of the urban heat island of Granada. *Int. J. Climatol.*, 20:899-911.

Morales CC, Madrigal D, González LA (2007): Isla de calor en Toluca, México. *Ciencia Ergo Sum*, 14:307-316.

Moreno MC (1994): Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *Int. J. Climatol.*, 14:705-710.

Oke TR (1987): *Boundary Layer Climates*. Segunda Edición. London, Routledge.

Sarricolea P, Aliste E, Castro P y Escobedo C (2008): Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. *Revista de Climatología*, 8:71-84.

Weng Q and Yang S (2004): Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city. *Journal of Enviromental Management*, 70:145-156.