Detección de la Isla Urbana de Calor mediante Modelado Dinámico en Mexicali, B.C., México

Africa Casillas-Higuera^(1*), Rafael García-Cueto⁽¹⁾, Osvaldo Leyva-Camacho⁽²⁾ y Felix F. Gonzalez-Navarro⁽¹⁾

Universidad Autónoma de Baja California, (1) Instituto de Ingeniería, (2) Facultad de Arquitectura, Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal s/n Col. Insurgentes Este, C.P. 21280, Mexicali, B.C., México (e-mail: acasillas@uabc.edu.mx; rafaelcueto@uabc.edu.mx; oleyca@uabc.edu.mx; fernando.gonzalez@uabc.edu.mx)

* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia.

Recibido Abr. 26, 2013; Aceptado Jun. 17, 2013; Versión final recibida Ago. 16, 2013

Resumen

El objetivo del estudio es aplicar, comparar y validar la técnica de modelado dinámico en la estimación de intensidad y hora en que ocurre la isla urbana de calor en Mexicali, México. Se analizaron diferencias térmicas horarias entre temperaturas urbanas y suburbanas de cuatro estaciones climatológicas durante el periodo 2002 a 2005. Mediante un algoritmo genético implementado con el software Stella se interpolaron temperaturas y se compararon con las calculadas por técnicas de interpolación elaboradas con un sistema de información geográfica. La validación se realizó mediante una prueba estadística de diferencia de medias. En tres estudios de caso se detectó el desarrollo de la isla urbana de calor con intensidades máximas promedio de 5.4°C, 5.2°C y 5.3°C. La validación evidenció que no existe diferencia significativa entre las interpolaciones realizadas con el modelo dinámico y con el sistema de información geográfica. Se concluye que el modelo dinámico es confiable y útil para el fin propuesto.

Palabras clave: isla urbana de calor, modelación dinámica, algoritmo genético, interpolación de temperaturas.

Detection of Urban Heat Island using Dynamic Modeling in Mexicali, B.C., Mexico

Abstract

The aim of this study is to apply, compare and validate the dynamic modeling technique to estimate intensity and time of occurrence of the Urban Heat Island (UHI) in Mexicali, Mexico. Hourly temperature differences between urban and suburban air temperatures of four weather stations during the period 2002 to 2005 were analyzed. Using genetic algorithms developed with the software Stella, air temperatures were interpolated and compared to those calculated with interpolation techniques developed with a Geographic Information System. Their similarity was validated by a statistical test of mean difference. In three case studies, the development of the UHI, with average intensities of 5.4°C, 5.2°C and 5.3°C was detected. The validation showed that there is no significant difference between the interpolations done with the dynamic model and with the Geographic Information System. It is concluded that the dynamic model is reliable and useful for the intended purposes.

Keywords: urban heat island, dynamic modeling, genetic algorithms, interpolating temperatures.

INTRODUCCION

Los países en desarrollo son vulnerables a los extremos de la variabilidad climática normal, y el cambio climático es probable que aumente la frecuencia y magnitud de algunos fenómenos meteorológicos extremos y en consecuencia incremento en el número de desastres asociados a esos fenómenos. La adaptación al cambio climático depende de la capacidad de adaptación actual y los modelos de desarrollo que están siendo adoptados por los países en desarrollo (Mirza, 2003). Si bien el problema de cambio climático es global, las raíces son eminentemente locales, al intervenir diferentes elementos que constituyen el medio ambiente urbano, que se explican como un conjunto numeroso de relaciones entre componentes naturales y sociales que se establecen al interior de las ciudades (Romero et al., 2010). El proceso de urbanización cambia de manera sustancial la cobertura y uso del suelo al aumentar las áreas construidas con materiales impermeables, y disminuye consecuentemente las zonas con vegetación, por lo que se modifica, entre otros: 1) el balance de energía, 2) los hábitats naturales, y 3) el valor estético del paisaje (Santana et al., 2010; Celis et al., 2007). Al alterar el balance de energía nativo de un lugar, por la introducción de materiales urbanos, la temperatura del aire en las ciudades aumenta significativamente con respecto a sus alrededores, fenómeno al que se le denomina Isla Urbana de Calor (IUC) (Voogt y Oke, 2003), el cual puede ser referido como un cambio climático antrópico; dentro de sus afectaciones negativas se encuentra el incremento en el consumo de energía y agua, la reducción en la ventilación que conduce a un aumento del estrés térmico y su asociación como catalizador para la formación de contaminantes atmosféricos que se encuentran relacionados con las infecciones respiratorias agudas (García et al., 2007; Deng y Wu, 2013, Ramírez et al., 2009), asimismo en Cuba debido al aumento de las temperaturas, el régimen de precipitación parece haber cambiado, así como la frecuencia de sequías (Zayas y González, 2013).

Así pues se observa que las ciudades son una evidencia clara y confirmatoria, de cómo el desarrollo económico ha dado lugar al cambio climático, que ha pasado el umbral de ser un cambio climático a nivel regional (ciudad), a un cambio climático a nivel global (planeta); pues la realidad muestra que los países de todo el mundo siguen el mismo patrón de crecimiento al concentrar de forma desordenada a la mayor parte de la población en espacios urbanos que se van improvisando, como consecuencia de la desaparición de las alternativas de subsistencia en medios rurales.

Respecto a la intensidad y la forma espacial de la isla urbana de calor en cada ciudad es un problema multifactorial que está íntimamente relacionada con sus controles superficiales y atmosféricos como lo son el tamaño, morfología, actividades al interior de la ciudad, densidad poblacional, etc., por lo que cada urbe determina su desarrollo de manera diferente; por ejemplo, las áreas verdes, como los parques, son relativamente fríos comparados con las áreas construidas de sus alrededores (Oke, 1995), mientras que la geometría urbana y las condiciones meteorológicas han revelado mayores intensidades con noches despejadas y viento en calma (Romero et al., 2008; Fung et al., 2009,). Se han propuesto varios métodos para la detección del fenómeno, entre ellos el analizar las diferencias termométricas de una red meteorológica de observación urbana-rural (Mohsin y Gough, 2012; Ren et al., 2007; Casillas y García-Cueto, 2008), recorridos urbanos en vehículos instrumentados (Brandsma y Wolters, 2012; Romero et. al., 2010) o modelación dinámica (Villanueva, 2013). En todos estos estudios se ha estimado la intensidad de IUC. También, se ha visualizado el patrón espacial de la IUC mediante imágenes de satélite (Sobrinho et al., 2013; Li y Yu, 2008), el cual adquiere un patrón característico según la ciudad que se esté analizando. Sin embargo no se ha utilizado la dinámica de sistemas para desarrollar un modelo capaz de estimar la ubicación geográfica y al mismo tiempo determinar la hora de ocurrencia de la IUC, que es el objetivo de este artículo.

Este estudio asume a la modelación como una representación abstracta y alternativa de la realidad a fin de desarrollar y validar una herramienta dinámica capaz de realizar un perfil térmico urbano, y detectar la intensidad, ubicación y hora en que se da la máxima intensidad de la IUC. Una de las ventajas de este simulador es que no se requiere ser un experto en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para visualizar el perfil térmico urbano y puede ser útil para desarrolladores urbanos y académicos involucrados en impactos ambientales provocados por el crecimiento de las ciudades.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La ciudad de Mexicali, lugar donde se desarrolló este estudio, se encuentra ubicada en el estado de Baja California, al noroeste de México; es una ciudad que colinda con Calexico, ubicada en California, Estados Unidos. Mexicali se encuentra a una latitud de 32.33°N, longitud 115.28°W y 4 m de altitud sobre el nivel medio del mar. Se caracteriza por tener uno de los climas mundiales más extremos pues su variabilidad

térmica estacional oscila de 0 °C en invierno a 50 °C durante el verano (Meza et al., 2010). Desde 1950 las industrias se empezaron a instalar en esta ciudad generando más empleos, lo que convirtió a Mexicali en una ciudad de intenso desarrollo, donde la inmigración desde otros estados de la República Mexicana y diversos países del mundo ha sido de manera continua, actualmente cuenta con una población de 950,000 habitantes (INEGI, 2010).

Datos y estaciones meteorológicas

Para la elaboración de este estudio se usaron temperaturas del aire horarias durante el período de 2000 a 2005, registradas en cuatro estaciones meteorológicas, de las cuales tres de ellas están en la zona urbana de Mexicali, B.C., México, y una en la zona rural de Calexico, California en Estados Unidos. La red de estaciones es operada por la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) de Estados Unidos en conjunto con el Gobierno Estatal de Baja California, México. La localización geográfica de las estaciones meteorológicas, se muestran en la Figura 1.

Fig. 1: Localización de estaciones meteorológicas en Mexicali, B.C., México y Calexico USA (elaboración propia)

A fin de mostrar la complejidad y diversidad en los paisajes ambientales circundantes a 1 km se describen a continuación las características físicas. La estación COBACH situada dentro del Colegio de Bachilleres, se localiza en la parte occidental de la ciudad, su principal uso de suelo es habitacional (69.11 %) y educativo (18.9 %), mientras que su área verde es solo 2.45 %; en la estación UABC, localizada en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, predomina el uso de suelo habitacional (55 %), siguiendo el educativo (20.13 %) y un porcentaje de vegetación importante (7.15 %); la estación ITM está ubicada en el Instituto Tecnológico de Mexicali, hacia el oriente de la ciudad, es una zona que comparte su uso habitacional (25.8 %) con lotes baldíos (20.5 %) e industriales (15 %); la estación rural EAST se encuentra ubicada al este de la ciudad de Calexico, Estados Unidos y su uso de suelo está dedicado principalmente a la agricultura (Casillas, 2009). En la Tabla 1 se listan las estaciones meteorológicas que tienen a su alrededor usos de suelo contrastante lo que permitió establecer un patrón comparativo en un radio de 1 km y definir la tipología en zonas de acuerdo a la clasificación de Stewart y Oke (2009).

Tabla 1: Ubicación y características físicas de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Estación	País	Punto (ver Fig. 1)	Ubicación	Tipología Stewart y Oke (2009)	Uso de suelo	Vista satelital Radio de 1 Km
COBACH	México	P1	32.37° N, 115.26° W	Urbanización Media Densidad	Habitacional, educativo y áreas verdes.
UABC	México	P2	32.38° N, 115.32° W	Urbanización Media Densidad	Habitacional, Comercial, educativo, áreas verdes (al oeste del lugar de medición) .
ITM	México	P3	32.37° N, 115.23° W	Industrias y Bodegas	Habitacional, escolar, lotes baldíos, industrial, comercial, corredores urbanos.
EAST	USA	P4	32.67° N, 115.39° W	Espacios Abiertos	Área verde dedicada a la actividad agrícola.

Los instrumentos de medición de temperatura del aire se encuentran protegidos de la lluvia y la radiación solar directa; las especificaciones técnicas de los termómetros son las siguientes: Rango de funcionamiento: -40 °C a 100 °C; Precisión: 0.1 °C; Resolución: 0.02 °C; Estabilidad: <0.1 °C por año; *Modelación*

El sistema fue desarrollado con el software comercial Stella v.9.0.2 ofrecido por la firma Isees System debido a que es un software específico para la construcción y simulación. Stella es sencillo de usar debido a su interfaz de usuario gráfica amigable (GUI) que permite una construcción rápida y eficaz. Incluye un lenguaje de programación de procedimiento. Las características esenciales del sistema se definen en términos de variables de estado, los flujos, variables auxiliares y flujos de información. Esta fase de simulación proporciona una oportunidad para que cualquiera de los parámetros enumerados arriba pueda ser cambiado a fin de lograr un sistema sostenible. El modelo dinámico así como la información utilizada en este artículo puede ser consultada y se encuentra disponible para fines científicos a través de <http://lsc.mx1.uabc.mx/~acasillas/recursos.html>.

Modelación de isotermas

El modelo dinámico fue dividido en dos subsistemas con los cuales se realizaron tres experimentos en días representativos de las estaciones de invierno, primavera y otoño (Febrero 4, Marzo 25 y Noviembre 4 respectivamente); el primer subsistema llamado "Isotermas IUC" (Figura 2), cuyo proceso principal es interpolar temperaturas urbanas con datos proporcionados de estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la ciudad, se estableció como {P1, P2 y P3} que corresponden a las temperaturas de las estaciones urbanas COBACH, UABC e ITM, respectivamente. Debido a que la estación EAST no se encuentra ubicada dentro del entramado urbano no fue utilizada en este proceso, sino en el que más adelante se describe.

Como Stella no incluye un bloque de construcción designado específicamente al algoritmo genético, se realizó su implementación mediante el uso de elementos de convertidor en una primera versión de la estructura general del algoritmo genético, que simula la distribución natural adaptada a la estimación de temperaturas del aire que se define en el diagrama de bloques (Figura 3), con el cual se interpoló el perfil térmico entre las estaciones meteorológicas urbanas, cuyo propósito es visualizar espacialmente e identificar la ubicación geográfica de la IUC. Las interpolaciones de temperaturas generadas por el modelo fueron exportadas a una matriz externa y posteriormente importadas al módulo "spatial map", las cuales fueron agrupadas en 11 diferentes clases y representadas visualmente en código de colores.

Fig. 2: Subsistema “Isotermas IUC” y Subsistema “Intensidad y hora”.

Fig. 3: Esquema general del algoritmo genético adaptado a la generación de temperaturas.

En el bloque 1 se trabaja con la generación inicial de temperaturas que fueron calculadas con datos leídos en las estaciones meteorológicas urbanas; las generaciones iniciales siguientes se calcularon a partir de las temperaturas estimadas mediante el modelo, en ambos casos, está definida mediante la postulación de la ecuación 1.

$$\text{Población inicial} = P1 - ((P1 - P2) / n + 1); P2 - ((P2 - P3) / n + 1) \quad (1)$$

En el bloque 2 se evalúan las adaptaciones de las temperaturas, es decir a menor variación de ganancia o pérdida térmica respecto a su temperatura original será mayor la probabilidad de que la temperatura sea seleccionada para reproducirse o fusionarse con una temperatura vecina en la matriz; las ecuaciones propuestas para evaluar la función de adaptación de las temperaturas son las ecuaciones 2 y 3. En el bloque 3 el criterio aplicado en esta primera versión del subsistema *Isotermas IUC* para seleccionar la temperatura más apta entre las estimadas fue la temperatura de mayor valor absoluto por ser una aproximación básica (ecuación 4). En el bloque 4 se utilizó el resultado de la ecuación 4 para crear una nueva generación a partir de la población existente con una mutación o variación de $\frac{1}{4}$ tomando como base el número de renglones de la matriz menos uno (ecuaciones 2 y 3), de acuerdo al bloque 5 las temperaturas mutadas estimadas son insertadas en la posición de la matriz correspondiente y en caso de no estar llena la matriz, el proceso continua.

$$TE\ 1 = \text{Temp_COBACH}_{xy} - ((\text{Temp_COBACH}_{xy} - \text{Temp_UABC}_{xy}) / 4) \quad (2)$$

$$TE\ 2 = \text{Temp_UABC}_{xy} - (((\text{Temp_UABC}_x - \text{Temp_ITM}_{xy}) / 4)) \quad (3)$$

$$\text{Selección TE} = \text{ABS}(TE\ 1) > \text{ABS}(TE\ 2) \quad (4)$$

Modelado de la intensidad y hora de la IUC.

El segundo sistema denominado "Intensidad y hora" (Figura 2), interactúa con el sistema "Isotermas IUC" al recibir como entrada la temperatura máxima del mismo, su objetivo principal es generar como salida datos más detallados del fenómeno. Se seleccionó el elemento de la matriz "algoritmo genético ciudadano" que tuviese el valor más alto para ser comparado con la temperatura de la misma hora del entorno rural, es decir, datos de la estación EAST; con la diferencia positiva de ambos se obtuvo la intensidad de la IUC de cada hora, posteriormente se hizo una comparación entre las 24 intensidades del día y se extrajo el valor más alto, que correspondió a la mayor intensidad de la IUC. La estimación de la intensidad de la IUC se realizó con la ecuación 5:

$$IUC = TU - TR \quad (5)$$

Análisis y validación de datos

El análisis y validación del subsistema "Intensidad y hora" fue cotejado mediante una gráfica de dispersión de datos. En ambas técnicas (subsistema y gráfica de dispersión) se realizó una estimación de promedios horarios en las 24 horas del día en el periodo 2000-2005, por lo que se generó una base de datos de 365 días con información promedio horaria.

Con las temperaturas estimadas mediante el subsistema "Isotermas IUC" se construyó un mapa de 25 puntos con forma de malla de 5x5 que tiene como frontera en la zona urbana los puntos P1 y P3, cada punto de la malla fue rellenada con una gama de colores que simula la distribución espacial de temperaturas. Por otra parte, el proceso del algoritmo genético se inicializó tomando como primera población los promedios de temperaturas horarias-diarias. Se utilizó la ecuación 4 para crear una nueva generación a partir de la población existente con una variación del 25% tomando como base el número de renglones de la matriz menos uno. De acuerdo al ajuste, la iteración fue concluida al alcanzar 22 generaciones o repeticiones, y de las temperaturas estimadas se insertaba en la matriz aquella que tuviera el mayor valor absoluto. Para la validación del subsistema "Isotermas IUC" se utilizó la prueba t de Student con un nivel de confianza del 95 % y 24 grados de libertad, el cual se consideró aceptable si no existía una diferencia estadísticamente significativa entre las interpolaciones de temperaturas elaboradas con el SIG Idrisi Andes y las clases de temperaturas estimadas con el algoritmo genético.

RESULTADOS

En el código de colores de las matrices resultantes del subsistema "isotermas IUC" (Figura 4.b) se muestran las diferentes distribuciones de temperaturas generadas mediante la elección de temperaturas del algoritmo genético para los tres experimentos realizados en la zona urbana analizada, en donde los puntos P1, P2 y P3 representan las estaciones meteorológicas COBACH, UABC e ITM, respectivamente, siendo los colores fríos como el negro las temperaturas bajas y los colores cálidos como el verde el mayor valor térmico. En dos de las fechas seleccionadas (febrero 4 y noviembre 4) la IUC se encuentra en el punto P3 mientras en marzo 25 el fenómeno se produce en el punto P2. Por lo tanto, la IUC en febrero 4 y noviembre 4 se localiza en el sureste de la ciudad, mientras que en marzo 25 la IUC se encuentra hacia el centro de la zona urbana.

La validación de los resultados generados mediante el subsistema "Isotermas IUC" elaborada con el Sistema de Información Geográfica Idrisi Andes (Figura 4.a), muestra una similitud en la ubicación de la IUC en los tres casos de estudio. Asimismo, la prueba t de Student aplicada a las clases de temperaturas reveló una t empírica menor respecto a la t teórica ($t=2.0639$); para febrero 4 la t empírica fue de 1.11, en marzo 25 de -1.42, y finalmente en noviembre 4 de 1.54. La Tabla 2 muestra las diferentes intensidades estimadas para la IUC en los estudios de caso; en dos de los resultados la IUC se desarrolla cuando el Sol ya se ha ocultado (febrero 4 y noviembre 4), mientras que en marzo 25 no ocurre lo mismo al tener su desarrollo durante el día, lo que parece deberse a la influencia de los vientos estacionales que ocurren durante este mes (García y Santillan op cit., 2012), que al presentarse con mayor frecuencia durante la noche, rompe el efecto de calor nocturno en la ciudad.

Tabla 2: Intensidad y hora de la IUC. Estudios de caso: febrero 4 a las 23:00, marzo 25 a las 12:00 y noviembre 4 a las 5:00 (°C = grados centígrados).

Día	TUrbana °C	TRural (East) °C	IUC intensidad MAX°C	Hora
Febrero 4	15.75	10.44	5.31	23:00
Marzo 25	30.57	25.2	5.35	12:00
Noviembre 4	16.00	10.78	5.22	5:00

Fig. 4.a: Mapas isotérmicos promedios (2000-2005) realizados con Idrisi Andes. 4.b: Código de colores que representan temperaturas espaciales interpoladas con el subsistema "Interpolación IUC" mediante un algoritmo genético. Estudios de casos: febrero 4 a las 23:00, marzo 25 a las 12:00 y noviembre 4 a las 5:00 (P1 = COBACH, P2 = UABC y P3 = ITM).

La comprobación de la intensidad y hora en los tres casos fue cotejada mediante gráficas de distribución horaria de datos de temperatura (Figuras 5, 6 y 7). El fenómeno coincide con ambas técnicas para el 4 de febrero y 4 de noviembre; a diferencia de los casos anteriores, para el 25 de marzo, discrepa en los resultados, el modelo indica el desarrollo de la IUC a las 12:00 con una intensidad de 5.4 °C, mientras que en la gráfica de distribución es difícil apreciar las diferencias térmicas entre las 13:00 y 15:00 horas.

Fig. 5: Distribución de temperaturas horarias promedio 2000-2005. Estudio de caso: febrero 4 a las 23:00 (* UABC, $\triangle$ COBACH, $\circ$ ITM, $\bullet$ EAST).

Fig. 6: Distribución de temperaturas horarias promedio 2000-2005. Estudio de caso: marzo 25 a las 12:00. (* UABC, $\triangle$ COBACH, $\circ$ ITM, $\bullet$ EAST).

Fig. 7: Distribución de temperaturas horarias promedio 2000-2005. Estudio de caso: noviembre 4 a las 5:00 (* UABC, $\triangle$ COBACH, $\circ$ ITM, $\bullet$ EAST).

DISCUSION

Las ocurrencias del evento IUC el 4 de febrero y el 4 de noviembre coinciden tanto en el período de ocurrencia como en su forma espacial al ubicar la IUC en la zona suroeste de la ciudad (ITM) donde predominan los usos de suelo habitacional (25.8 %), lotes baldíos (20.5 %) e industrial (15 %). Debido a que Stella es una herramienta matemática fue posible detectar una modificación en el comportamiento del fenómeno en marzo 25; referente al aspecto espacial, se desarrolla en el centro de la ciudad alrededor de la estación UABC, donde predomina el uso de suelo habitacional (55 %), educativo (20.13 %) y de vegetación importante (7.15 %).

En lo que se refiere al aspecto temporal, pasa de ser una IUC nocturna a una diurna al tener su presencia a las 12:00 pm con una intensidad de 5.35 °C, evento similar al que ocurre en el caso analizado en Ciudad Juárez, México (Contreras et al., 2008) que reportó una IUC diurna de 6°C. La presencia de la IUC implica un aumento adicional en el consumo energético que en las ciudades de zonas áridas de México rebasa el consumo medio nacional, siendo Mexicali la ciudad que tiene el mayor consumo eléctrico por vivienda (Calderón et al., 2011).

El desplazamiento de la IUC a diferentes espacios intra-urbanos no es un comportamiento exclusivo de la ciudad de Mexicali, en la ciudad de Santiago de Chile los cambios y desequilibrios sobre el clima urbano crean islas y micro islas urbanas de calor que se desplazan del centro de la ciudad hacia la zona Oeste, la primera se encuentra ubicada en el centro histórico rodeado por áreas comerciales, y la segunda en el aeropuerto que colinda con zonas industriales y áreas residenciales de alta densidad (Romero op cit., 2010).

Lo anterior indica que la modificación en la ubicación geográfica de la IUC a diferentes zonas no está asociado en su totalidad a factores físicos o de construcción impuestos por el hombre, ya que también influyen factores ambientales como la radiación solar, velocidad de viento, estación solar y procesos antropogénicos, así como el incremento acelerado de las temperaturas mínimas en la región (Camargo-Bravo y Garcia-Cueto, 2012).

De acuerdo a las pruebas t de student realizadas en los tres casos de estudio los resultados del modelo dinámico no muestran diferencias significativas con las técnicas estadísticas o de interpolación generadas con Idrisi, lo que indica que la modelación dinámica es confiable en representar el comportamiento de la IUC y la visualización espacial de distribución térmica en la ciudad, tal como lo menciona el estudio realizado por Villanueva (op. cit., 2013) en Mexicali, donde se aplica la modelación dinámica sin algoritmos genéticos para crear escenarios de mitigación de IUC teniendo como limitante que se enfoca solo en el punto central de la ciudad.

Como limitante del presente trabajo se encuentra que solo toma en cuenta la temperatura del aire, por lo que una posible línea futura de investigación es añadir algunas variables relacionadas con el entorno del lugar de mediciones (factor de vista de cielo, uso de suelo, cobertura de suelo), climáticas (radiación solar, velocidad y dirección de viento) y sociales (densidad poblacional y actividad antropogénica) que han demostrado su relación con la IUC.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que el modelo propuesto es confiable para detectar la intensidad, hora y ubicación geográfica de la IUC. El desarrollo más importante de la IUC se dio en la zona suroeste de la ciudad con una intensidad máxima de 5.33 °C, en un tipo de uso de suelo mixto.

El estudio demuestra que la transformación de las áreas nativas en áreas urbanas, son capaces de incrementar el calentamiento del sistema climático a una escala muy local, como es la ciudad, y que ese calentamiento puede incluso ser superior al que los modelos climáticos de escala global estiman para fines de este siglo. Debido a lo anterior, es importante la modelación de problemas ambientales como la isla urbana de calor a fin de proponer soluciones integrales hacia un desarrollo urbano sustentable que involucren a autoridades gubernamentales, sectores productivos, sector académico y actores locales.

Además de aportar una visualización espacial de la distribución de temperaturas en la ciudad, mediante la dinámica de sistemas fue posible observar el desplazamiento geográfico del fenómeno sin necesidad de utilizar un sistema de información geográfico o ser un experto en programación. Este modelo resulta ser una herramienta amigable para desarrolladores urbanos y personal dedicado al estudio ambiental, el cual está disponible en la página web <http://lsc.mx1.uabc.mx/~acasillas/recursos.html>

NOTACIÓN

$P1$, temperaturas promedio horarias de la estación COBACH.
 $P2$, temperaturas promedio horarias de la estación UABC.
 $P3$, temperaturas promedio horarias de la estación ITM.
 n , total de datos (temperaturas reales).
 $Temp_COBACH$, temperatura estimada a partir de la estación COBACH.
 $Temp_UABC$, temperatura estimada a partir de la estación UABC.
 $Temp_ITM$, temperatura estimada a partir de la estación ITM.
 X , posición de la columna en la matriz algoritmo genético ciudadano.
 Y , posición del renglón de la matriz algoritmo genético ciudadano.
 $TE1$, temperatura estimada entre COBACH y UABC.
 $TE2$, temperatura estimada entre UABC e ITM.
 TU , temperatura máxima del sistema isotermas.
 TR , temperaturas horarias promedio (2000-2005) de la estación EAST.

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT por el apoyo económico otorgado, a MI. René Delgado, Dr. Michael Schorr y a Lic. Julio Cesar Mendivil.

REFERENCIAS

- Brandsma T. y D. Wolters, *Measurement and statistical modeling of the urban heat island of the city of utrecht (the netherlands)*, J. Appl. Meteor. Climatol., 51, 1046–1060 (2012).
- Camargo-Bravo A. y R. García-Cueto, *Evaluación de dos Modelos de Reducción de Escala en la Generación de Escenarios de Cambio Climático en el Valle de Mexicali en México*. Información tecnológica, 23 (3), 11-20 (2012).
- Casillas H.A. y O.R. García-Cueto, *Análisis de la isla urbana de calor y tendencias de la temperatura mínima en Mexicali, B.C., México*, VI Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología, Publicación de la asociación española de climatología (AEC) Serie A, 6:759-768, (2008).
- Casillas H.A., *Climatología de la Isla Urbana de Calor en Mexicali, B.C. y su relación con el Uso de Suelo*, Tesis de Maestría, Instituto de Ingeniería, Univ. Autónoma de Baja California, Mexicali, México, (2009).
- Calderón, R., Arredondo, J.A, Gallegos, R., y Mayagoitia, F., *Reducción del Consumo Eléctrico y CO₂ mediante Sistemas de Ahorro y de Aislamiento Térmico aplicados a Viviendas en Zonas Áridas de México*. Información tecnológica, 22(2), 69-78 (2011). Recuperado en 22 de julio de 2013, de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642011000200008&lng=es&tlng=es. 10.4067/S0718-07642011000200008.
- Celis, J.E, Morales, J.R, Zaror, C.A, y Carvacho, O.F., *Contaminación del Aire Atmosférico por Material Particulado en una Ciudad Intermedia: El Caso de Chillán (Chile)*. Información tecnológica, 18(3), 49-58 (2007). Recuperado en 22 de julio de 2013, de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642007000300007&lng=es&tlng=es. 10.4067/S0718-07642007000300007.
- Contreras C.A., S.J. Salas, A.G. Velásquez y U.H. Quevedo, *Determinación de la isla urbana de calor en ciudad Juárez mediante programa de computo, CULCyT*, (26), 2-16 (2008).
- Deng C. y C. Wu, *Examining the impacts of urban biophysical compositions on surface urban heat island: A spectral unmixing and thermal mixing approach Remote Sensing of Environment*, 131, 262-274 (2013).
- Fung W.Y., K.S. Lam, J. Nichol y M.S. Wong, *Derivation of nighttime urban air temperatures using a satellite thermal image*, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 48(4), 863-872 (2009).
- García-Cueto R., O.E. Jaúregui, D. Toudert y A.M. Tejeda, *Detection of the urban heat island in Mexicali, B.C., Mexico and its relationship with land use*, Atmósfera, 20(2), 111-113 (2007).

- García-Cueto R. y N. Santillán, *Modeling Extreme Climate Events: Two Case Studies in México*, Climate Models, INTECH ISBN: 979-953-307-338-4. (2012)
- INEGI. Censo de población y vivienda 2010, *Consulta interactiva de datos*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2010), <http://www.censo2010.org.mx/>, Acceso: 21 de Marzo (2013).
- Li K. y Z. Yu, *Comparative and combinative study of urban heat island in Wuhan city with remote sensing and cfd simulation*, Sensors, 8(10), 6692-6703 (2008).
- Meza, L.M., Quintero, M., García, R., y Ramírez, J., *Estimación de Factores de Emisión de PM10 y PM2.5, en Vías Urbanas en Mexicali, Baja California, México*. Información tecnológica, 21(4), 45-56. (2010). Recuperado en 22 de julio de 2013, de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642010000400007&lng=es&tlng=es. 10.4067/S0718-07642010000400007.
- Mirza, M., *Climate change and extreme weather events: Can developing countries adapt?* Climate Policy 3:233_248 (2003)
- Mohsin T. y W.A. Gough, *Characterization and estimation of urban heat island at Toronto: impact of the choice of rural sites*, Theoretical and Applied Climatology, (108), 105-117 (2012).
- Oke, T.R., *The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects*. Kluwer Academic, 81-107. (1995).
- Ramírez-Rembao, M., Rojas, R.I., y García-Cueto, R., *Influencia de los Contaminantes Atmosféricos en las Infecciones Respiratorias Agudas en Mexicali-Baja California, México*. Información tecnológica, 20(3), 89-100. (2009). Recuperado en 22 de julio de 2013, de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642009000300011&lng=es&tlng=es. 10.4067/S0718-07642009000300011.
- Ren G.Y., Z.Y. Chu, Z.H. Chen e Y Y. Ren, *Implications of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations*, Geophysical Research Letters, 34(5), L05711 (2007).
- Romero, H., Irrázaval, F., Opazo, D., Salgado, M., y Smith, P., *Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile*. EURE (Santiago), 36(109), 35-62. (2010). Recuperado en 14 de agosto de 2013, de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-71612010000300002&lng=es&tlng=es. 10.4067/S0250-71612010000300002.
- Romero H., M. Salgado y P. Smith, *Cambios climáticos y climas urbanos: Relaciones entre zonas termales y condiciones socioeconómicas de la población de Santiago de Chile*. Revista INVI, 25(70), 151-179 (2010).
- Romero L., P. Máyer, A. Hernández y P. Ruiz, *Análisis de la distribución espacial de la isla de calor urbana en Las Palmas de Gran Canaria mediante el uso de sistemas de información geográfica*. Resultados preliminares. In Tecnologías de la Información Geográfica para el desarrollo territorial, XIII Congreso Nacional De Tecnologías de la Información Geográfica p. 65, (2008)
- Santana L.M., L.A. Escobar y P.A. Capote, *Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite*, Revista de geografía Norte Grande, (45), 77-95 (2010).
- Sobrino J.A. y otros 13 autores, *Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid by thermal remote sensing*, International Journal of Remote Sensing (34), 9-10 (2013).
- Stewart I.D. y T.R. Oke, *Newly developed thermal climate zones for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer*. In: International Association for Urban Climate (Ed.) 8th Symposium on the Urban Environment, 10-15 January, 2009, Phoenix, AZ. Phoenix, American Meteorological Society. pp. 1-4. (2009)
- Villanueva S.J., A. Ranfla y M.A. Quintanilla, *Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo*, Información Tecnológica, 24(1), 15-24 (2013).
- Voogt A., y T.R. Oke, *Thermal remote sensing of urban climates*, Remote sensing of Environment, 86 (3), 370-384 (2003).
- Zayas, L y González C., *Estudio de la fecha del paso de la temperatura media del aire por encima y por debajo de 25°C en la zona occidental de Cuba*, Revista de climatología, Vol. 13: 1-15 (2013).