






Urbanización y su relación con la isla de calor en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Urbanization and its relationship with urban heat island in Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Mariana Zavaleta-Palacios¹ ,
Emmanuel Díaz-Nigenda^{1*} ,
Williams Vázquez-Morales¹ ,
Horacio Morales-Iglesias¹ ,
Gabriela Narcizo de Lima¹ 

¹Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático. Lib. Norte Pte. 1150. Col. Lajas Maciel. CP. 29039. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

*Autor de correspondencia:
emmanuel.diaz@unicach.mx

Artículo científico

Recibido: 29 de noviembre de 2019

Aceptado: 14 de Agosto 2020

Como citar: Zavaleta-Palacios M, Díaz-Nigenda E, Vázquez-Morales W, Morales-Iglesias H, Lima GN (2020) Urbanización y su relación con la isla de calor en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 7(2): e2485. DOI: 10.19136/era.a7n2.2485

RESUMEN. El cambio de uso de suelo es uno de los problemas más complejos que se observa como parte del proceso de expansión urbana, lo cual trae como consecuencia la formación de la Isla de Calor Urbano (ICU). Con el objetivo de identificar la presencia de la ICU en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, se implementó el modelo meteorológico MM5 para simular las condiciones meteorológicas durante el período del 30 de abril al 6 de mayo de 2017. Con base en las condiciones atmosféricas, se seleccionó el día 3 de mayo para ilustrar la ICU sobre la zona de estudio. Los resultados muestran la existencia del fenómeno sobre la ciudad a diferentes horas del día con intensidades que varían de 0.5 a 2.5 °C, sin embargo, éstas podrían ser mayores a los 5 °C y afectar principalmente la zona centro de la ciudad debido a factores como las propiedades del suelo, los flujos de calor, así como las características geomorfológicas del lugar. Por otro lado, se simuló un cambio de uso de suelo a partir de las tendencias de crecimiento actual de la ciudad, observándose en algunos casos un incremento en la extensión e intensidad de la ICU. Por tanto, se señala la presencia de la ICU en la ciudad donde se indica la importancia de la protección y conservación de las áreas verdes, por lo que los estudios relacionados a la ICU deberían ser considerados como parte de la planeación territorial para el desarrollo urbano.

Palabras clave: Cambio de uso de suelo, expansión urbana, MM5, relieve, temperatura del aire.

ABSTRACT. Land use change is one of the most complex problems observed as part of the urban expansion process. It generates different consequences such as the Urban Heat Island (UHI) development. With the objective of identifying the presence of UHI in Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, MM5 meteorological model was implemented to simulate the meteorological conditions for April 30th to May 6th, 2017. Considering the atmospheric conditions over the study area, the UHI was represented at different times of May 3rd, 2017. The results show the formation of the UHI over the city at different hours during the day. The UHI intensity varies from 0.5 to 2.5 °C but, it could be higher than 5 °C. The UHI affects mainly the center of the city as a consequence of factors such as soil properties, heat fluxes, and the geomorphological characteristics of the study area. Furthermore, considering the actual growth of the city, land use change was simulated. In some cases, the results show a bigger area and a higher intensity of the UHI phenomenon. Therefore, the presence of the UHI in the city is showed and the importance of the protection and conservation of green areas is indicated, which points out that UHI studies should be considered as part of territory planning for urban development.

Key words: Land use change, urban expansion, MM5, relief, air temperature.

INTRODUCCIÓN

Tuxtla Gutiérrez, capital del estado de Chiapas, ha experimentado un desarrollo urbano acelerado y con poca planificación. Este crecimiento ha permitido que la ciudad se expanda hacia los municipios de San Fernando (norte), Suchiapa (sur), Chiapa de Corzo (este) y Berriozábal (oeste), lo cual, de acuerdo con la SEDATU (2018), ha dado paso a la formación de la Zona Metropolitana de Tuxtla Gutiérrez (ZMTG). La ausencia de una figura de protección y de un plan de manejo sustentable en distintas áreas de la ZMTG, genera que la cobertura vegetal sea sustituida por tierras para uso agropecuario y urbano, reflejándose en las más de cuatro mil hectáreas que ha crecido el área urbana de Tuxtla Gutiérrez en el período comprendido entre 1986 y 2014 (Silva *et al.* 2015). Ante esta situación se han desarrollado instrumentos que buscan protección al ambiente, la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales (SGG 2017).

Hoy en día se observa un crecimiento urbano con una planeación deficiente, situación relevante debido a que los componentes biofísicos a nivel local (como clima, relieve y vegetación) están estrechamente relacionados con el uso de suelo. La modificación de estas características puede repercutir en la meteorología local e incluso, podría tener consecuencias a nivel regional (Gaur *et al.* 2018, Soto-Estrada 2019). Además de provocar inundaciones en las partes bajas de la ciudad (Espinosa-Rodríguez *et al.* 2017, González *et al.* 2018, Lima y Magaña 2018), afectar la calidad del aire (Díaz-Nigenda *et al.* 2018), así como potenciar el fenómeno de la ICU (Wicki *et al.* 2018, Yao *et al.* 2018).

El fenómeno de ICU se presenta cuando las ciudades son más cálidas comparadas con el medio rural o menos urbanizado que las rodea debido a la sustitución de superficies cubiertas de vegetación por materiales de mayor capacidad térmica (Oke *et al.* 2017, Henríquez y Romero 2019). Esto trae como consecuencia el aumento de la frecuencia e intensidad de eventos extremos de precipitación y de calor, que a su vez pueden ocasionar sequías, mermas de cuerpos de agua, incendios forestales, altos índices

de morbilidad y mortalidad, así como influir en el confort térmico (Oke *et al.* 2017). La ICU, es uno de los fenómenos meteorológicos urbanos más documentados a nivel mundial (Gaur *et al.* 2018, Wicki *et al.* 2018, Yao *et al.* 2018, Soto-Estrada 2019, Henríquez y Romero 2019). En México se han realizado varios estudios para la detección de ICU mediante la implementación de técnicas que contemplan desde el procesamiento de imágenes satelitales hasta el análisis de datos de estaciones climatológicas. De este modo, la ICU ha sido reportada en la Ciudad de México (Ballinas y Barradas 2016), Querétaro (Colunga *et al.* 2015), Tampico (Fuentes 2014, 2015), Torreón (Flores-De la O *et al.* 2018) y Ciudad Juárez (Salas-Esparza y Herrera-Sosa 2017), entre otras. Para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, la falta de estudios relacionados al fenómeno de ICU, demuestra que éste no ha sido tomado en cuenta para la creación de los programas de Ordenamiento Territorial que se han establecido. Por lo que la amenaza que constituye la presencia de la ICU ha sido ignorada desde la creación de la ZMTG, de seguir así, no solo se incrementaría la magnitud y extensión de la ICU, sino que además, sería poco probable establecer las medidas de mitigación pertinentes. Por consiguiente, el objetivo fue identificar la presencia de la ICU en la ciudad, para conocer el impacto del cambio de uso de suelo en la zona de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

En un contexto regional, Tuxtla Gutiérrez se ubica en el extremo noroeste de la depresión Central de Chiapas (Bollo *et al.* 2015); colinda al norte con las montañas del Parque Nacional Cañón del Sumidero, al este con el río Grijalva y la ciudad de Chiapa de Corzo, al sur con el cerro Mactumatzá y el Valle de Suchiapa, al oeste con las estribaciones del sistema montañoso que integran la cuenca alta del río Sabinal. Las coordenadas geográficas extremas son: 16° 40' 30" y 16° 48' 00" LN y 93° 01' 35" y 93° 13' 10" LO (Figura 1). La ciudad se ubica a una altitud de 522 metros sobre el nivel del mar (msnm). El relieve se distingue por la alternancia de montañas



Figura 1. Zona de estudio. Los puntos verdes indican la ubicación de las estaciones meteorológicas instaladas a lo largo de la ciudad. El centro de la ciudad se ubica sobre la estación Palacio. Los recuadros muestran los dominios de simulación. Las líneas azules representan la presencia de cuerpos de agua. Las líneas café representan la elevación en msnm.

de origen tectónico-kárstico, tectónico-acumulativo y valles tectónico-fluviales. El clima se caracteriza como cálido subhúmedo con lluvias en verano, una temperatura máxima promedio de hasta 34.5 °C y una mínima promedio de 12 °C, mientras que la precipitación media anual oscila entre 900 y 1 000 mm (Morales-Iglesias 2017, CEIEG 2019).

Configuración del modelo

Por sus características, el Modelo de Mesoescala de Quinta Generación, también conocido como MM5, puede ser utilizado para el estudio de huracanes y monzones, mientras que a mayor resolución se pueden realizar análisis de sistemas convectivos de mesoescala, frentes, brisas tierra-mar, circulaciones de montaña-valle e islas de calor urbano (Dudhia *et al.* 2005). El MM5 se utilizó para simular el período del 30 de abril al 6 de mayo del

2017, con la finalidad de observar la variación de las temperaturas e identificar la formación de la ICU en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Este escenario fue seleccionado debido a que los registros históricos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA 2016) señalan a los meses de abril y mayo como los más calurosos y secos en la región de estudio, lo que favorece una mejor visibilidad del fenómeno debido a la poca interferencia por la formación de nubes, lo que permite que la modelación sea menos compleja y más cercana a la realidad.

Para la configuración del MM5 se generaron cuatro dominios, el último de ellos (dominio 4) tiene una resolución espacial de 1 km y en su interior se ubica la ciudad de Tuxtla Gutiérrez (Figura 1). Debido a la resolución espacial de los dominios 3 y 4 (Tabla 1), los datos de elevación y uso de suelo fueron corregidos con la finalidad de representar de

mejor manera el relieve de la región, para lo cual se empleó un modelo digital de elevación, así como la Carta de uso de suelo y vegetación de la serie V del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2014). Para la inicialización del modelo, se utilizaron datos meteorológicos globales de análisis final con una resolución espacial de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ y temporalidad de 6 h (NCEP 2000). Para mejorar el análisis meteorológico realizado por el modelo durante la simulación en la región de interés, se utilizó la técnica de análisis objetivo (Grell *et al.* 1994, Dudhia *et al.* 2005), mediante la incorporación de variables observadas por las estaciones meteorológicas instaladas a lo largo de la ciudad para el dominio de mayor resolución.

Tabla 1. Descripción de dominios de simulación.

# Dominio	Dimensiones (celdas)	Resolución (km)
1	60 x 60	27
2	46 x 46	9
3	31 x 31	3
4	46 x 43	1

Para evaluar el desempeño del MM5, se compararon los resultados del modelo contra los valores observados por las estaciones meteorológicas mediante un análisis cualitativo y cuantitativo, que contempló el empleo de gráficas (Figura 2), un análisis de regresión de acuerdo con Walpole *et al.* (2012) y la aplicación del índice de concordancia mejorado (d_r) propuesto por Willmott *et al.* (2012). Los resultados generados por el modelo (escenario base), referidos a las temperaturas en superficie, se procesaron mediante el método de interpolación Kriging en ArcMap versión 10.1 (ESRI 2011) para generar mapas de isotermas sobre el área de interés para identificar la ICU en la ciudad. Para calcular la intensidad de la ICU durante el día, se seleccionó un punto de referencia localizado en la zona periurbana al oeste de la ciudad, que se encuentra alejado de la zona de mayor desarrollo urbano en la que se observan áreas de pastizal (Figura 3).

Escenario de expansión urbana

Para la simulación del escenario de expansión urbana (EEU), se modificó la configuración de los

datos de uso de suelo del dominio 4 realizada para el escenario base, en el que se cambiaron a suelo urbano algunas zonas con uso forestal o agrícola. Esto se realizó bajo el supuesto que la dinámica de crecimiento de la ciudad conecte el centro urbano principal con las urbes más cercanas, para ello se tomó como referencia el crecimiento de la zona urbana observado por Silva *et al.* (2015). (2015). Los resultados se procesaron con el mismo método de interpolación que los del escenario base para visualizar si la ICU incrementaba su magnitud o en su caso, el área de influencia.

RESULTADOS

Evaluación del desempeño del modelo MM5

Configurado el modelo MM5 para las condiciones geomorfológicas, uso de suelo y vegetación de la zona de estudio, se realizó la simulación del período de interés, lo que permitió evaluar el desempeño del modelo para conocer la presencia de la ICU sobre la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. En la Figura 2 se comparan las series de tiempo de temperatura del aire medidas por las estaciones y los generados por el MM5, de acuerdo con los datos observados, las temperaturas más altas se tuvieron en la estación Palacio, mientras que las temperaturas más bajas en la estación Arroyos. Al comparar los resultados del modelo con los datos de las estaciones, se observa que las temperaturas simuladas son similares a las observadas, presentando las temperaturas máximas entre las 14:00 y 16:00 h, y las mínimas entre 04:00 y 06:00 h; mientras que el modelo MM5 muestra temperaturas menores en comparación con las mediciones en algunas horas, especialmente en la estación Palacio, lo que indica que el modelo subestima la temperatura.

Para el análisis de regresión se observa que los datos de temperatura simulados y los observados presentan una tendencia lineal positiva con valores aceptables en los coeficientes de determinación (R^2), la estación SCT es la que presenta el coeficiente más bajo ($R^2 = 0.81$), pero no se observa una variación considerable con respecto a la estación Palacio y Arroyos ($R^2 = 0.82$ en ambos casos).

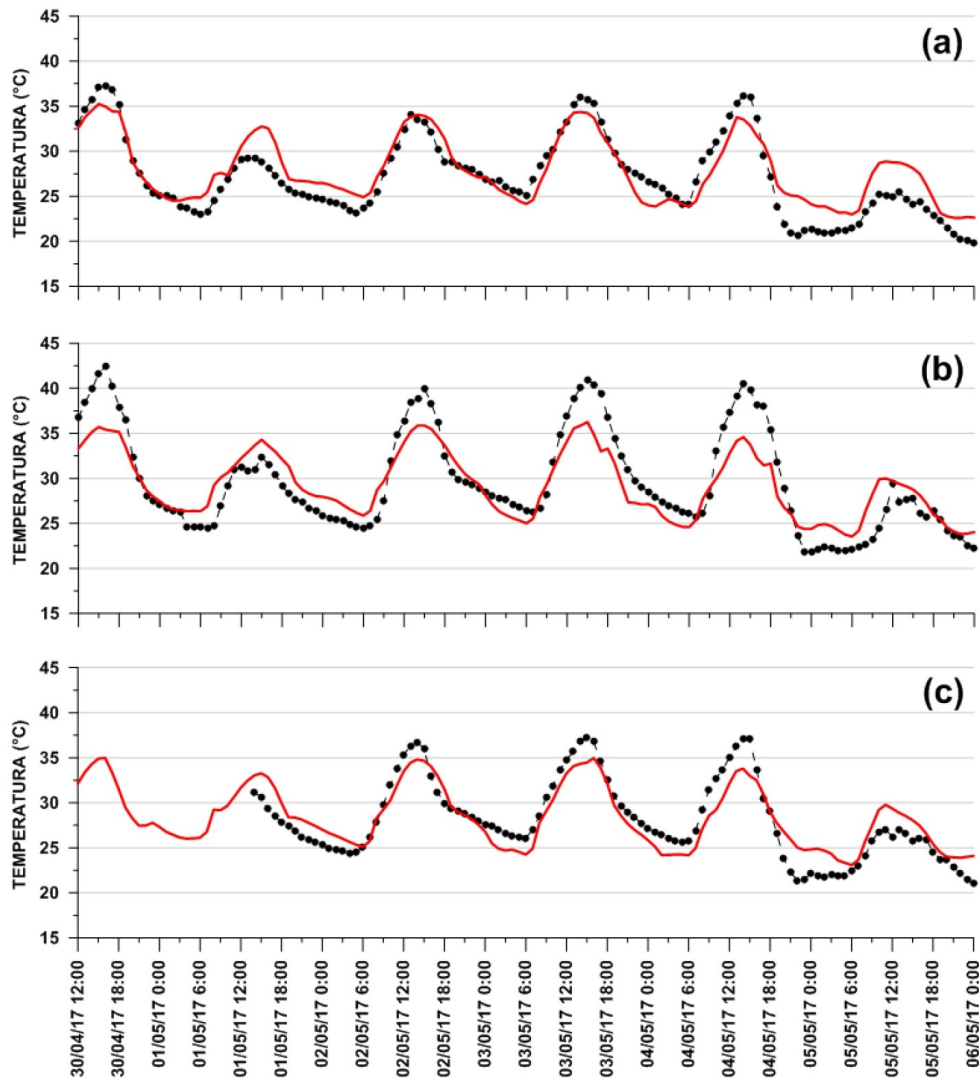


Figura 2. Series de tiempo de temperatura del aire reportados por las estaciones meteorológicas (●) y generados por el modelo (-) durante el período del 30 de abril al 06 de mayo del 2017. (a) Estación Arroyos. (b) Estación Palacio. (c) Estación SCT.

Por otro lado, el d_r indica que los datos generados por el modelo se aproximan a los datos observados cuando d_r tiende a 1. En las estaciones Arroyos y SCT se tuvo un $d_r = 0.77$, mientras que en la estación Palacio el índice resultante fue menor (0.75). De acuerdo con lo anterior, las temperaturas del modelo se aproximan a las temperaturas observadas, sin embargo, las temperaturas simuladas se encuentran subestimadas en algunas horas, lo cual deberá tomarse en cuenta para la interpretación de

los resultados, principalmente para la zona centro de la ciudad (estación Palacio).

Simulación escenario base

Al no existir la influencia de algún fenómeno sinóptico que pudiera alterar los resultados, se seleccionó el día 3 de mayo para determinar la presencia de ICU en la zona de estudio. En la Figura 3 se observa la evolución de las temperaturas durante el día, presentándose las temperaturas más

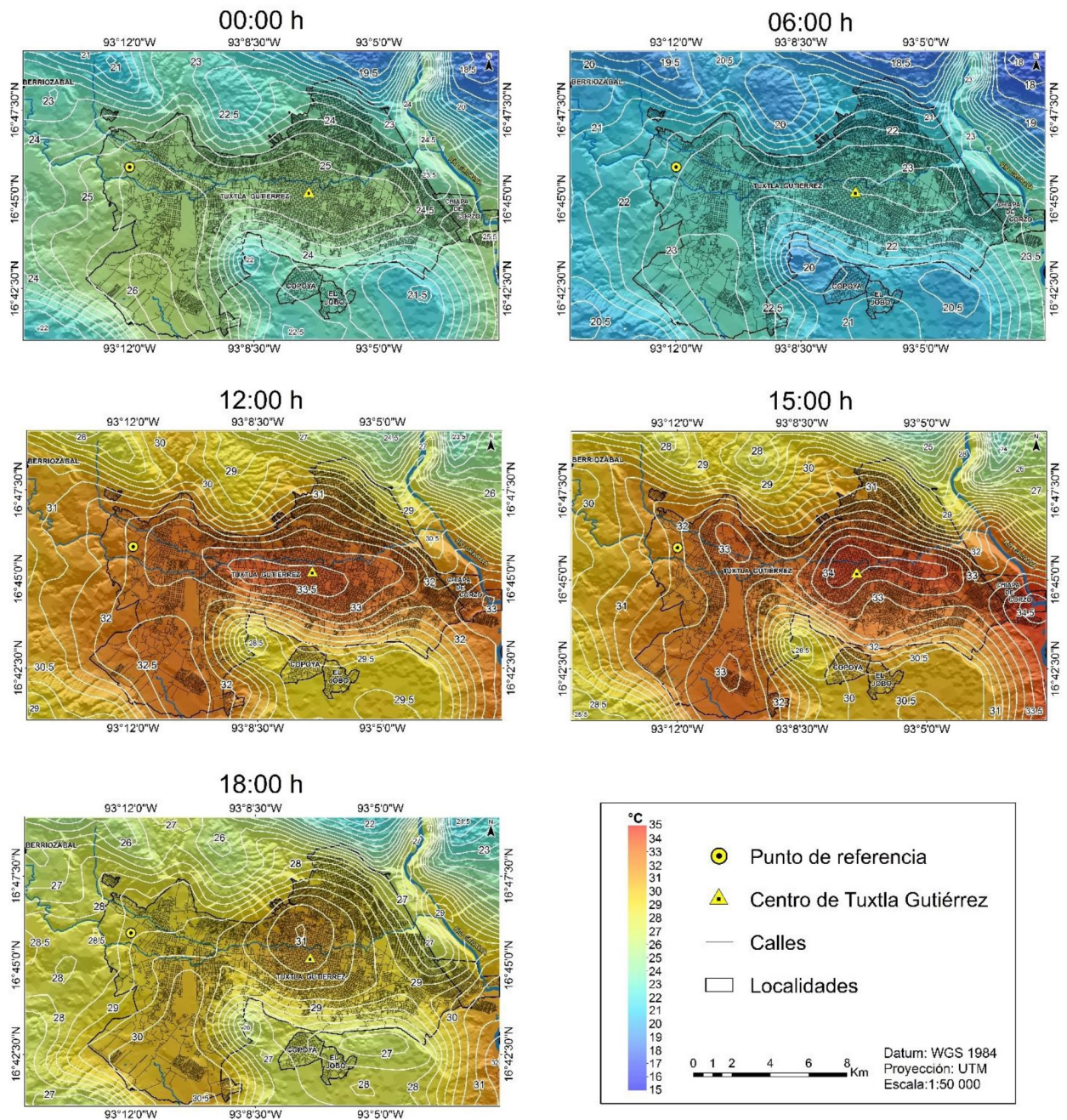


Figura 3. Mapa de temperatura del escenario base a las 00:00 h, 06:00 h, 12:00 h, 15:00 h y 18:00 h del día 03 de mayo del 2017. Las líneas blancas denotan las isotermas ($^{\circ}\text{C}$).

bajas al norte y al sur del área de estudio, lo cual corresponde a las zonas con mayor margen altitudinal. La temperatura más baja (18°C) se presentó sobre las montañas localizadas al noreste de la ciu-

dad a las 06:00 h, mientras que la más alta (34.5°C) al oriente a las 15:00 h, en las colindancias con el municipio de Chiapa de Corzo. También se observa que a las 00:00 h no se tiene la presencia

de ICU definida sobre la ciudad. Con el paso del tiempo, las propiedades de los diferentes materiales de construcción comienzan a jugar un papel muy importante, ya que algunos materiales disipan el calor más rápido que otros lo que favorece la formación de la isla de calor. En este sentido, a las 06:00 h se observa la formación de la ICU con una extensión de 8.1 km² que abarca la zona centro y oriente de la ciudad. Al tomar en consideración el punto de referencia, la ICU presenta una intensidad de 1 °C aproximadamente.

A las 12:00 h se observa la presencia de la ICU con extensión de 6.8 km² e intensidad cercana a 1.5 °C, con ubicación predominante sobre la zona centro y poniente de la ciudad. En tanto, que a las 15:00 h se tiene el registro de las mayores temperaturas sobre la zona urbana, la ICU sufre un desplazamiento en dirección este sobre la ciudad como resultado del estrechamiento topográfico en la zona de estudio, por lo que la ICU se ubica en las partes más bajas. Al desplazarse la ICU reduce su extensión (5.8 km²) pero incrementa su temperatura a 34 °C. Mientras que, de acuerdo al punto de referencia, la ICU alcanzaría una intensidad de 2.5 °C.

Por otra parte, a las 15:00 h se presenta la formación de dos ICUs de menor intensidad, la primera al noroeste sobre la estación Arroyos, mientras que la segunda al suroeste de la ciudad. Ambas islas presentan una intensidad cercana a 1.5 °C con respecto al punto de referencia, cuyo origen podría estar asociado con la expansión urbana y la escasa cobertura vegetal. También se observa la formación de una ICU con temperatura de 34.5 °C en las colindancias con el municipio de Chiapa de Corzo, misma que es el resultado de la configuración del relieve representada por un valle ubicado en el menor rango altitudinal de la zona de estudio, el cual, conjugado con la presencia del Río Grijalva, intervienen en el intercambio energético que influye sobre la intensidad del fenómeno. Para las 18:00 h las temperaturas disminuyen, sin embargo, una ICU con temperatura de 31 °C, extensión de 0.2 km² e intensidad de 2.5 °C aproximadamente, se observa en las cercanías del centro de la ciudad. Esto indica que la ICU presenta intensidades que varían entre 1 y 3 °C durante el día,

lo que afecta principalmente la zona centro de la ciudad.

Los resultados de la Figura 2 muestran que el modelo subestimó las temperaturas en la estación Palacio. Al considerar la diferencia en la aproximación de las temperaturas en la zona centro de la ciudad, se puede deducir que la ICU tendría una intensidad mayor a 5 °C, lo que es de interés de acuerdo a las implicaciones que esto generaría.

Simulación escenario expansión urbana (EEU)

Los resultados de la simulación del EEU muestran que, si la ciudad continúa un desarrollo similar a lo que ha experimentado en las últimas décadas, el fenómeno de la ICU mantendría un comportamiento similar con el del escenario base durante el transcurso del día. Sin embargo, la ICU modificaría su forma y ubicación cuando se encuentre en la zona centro de la ciudad, mientras que aquellas que se forman al sur y suroeste incrementarían su extensión e intensidad hasta 0.5 °C (12:00 h, 15:00 h y 18:00 h), lo que coincide con aquellas zonas en donde el uso de suelo fue modificado (Figura 4). Por otro lado, las islas que se forman en la parte oeste de la ciudad, permanecen durante más tiempo; en el escenario base se presentaban a las 12:00 h y 15:00 h, mientras que en el EEU se observan también a las 18:00 h.

DISCUSIÓN

El modelo MM5 implementado para determinar la presencia de ICU en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, para las condiciones meteorológicas del 30 de abril al 6 de mayo del 2017, indica que la modelación mostró una buena aproximación a los datos observados por las estaciones meteorológicas presentes en la ciudad (Figura 2). Los valores obtenidos de R² (mayor a 0.82) y del d_r (mayor a 0.75) indican que la modelación es aceptable, por lo que el modelo representa de forma adecuada la meteorología en la zona de estudio. En la modelación se observó una subestimación de las temperaturas en la zona centro de la ciudad, atribuido a la baja resolución espacial del modelo que no parametriza de

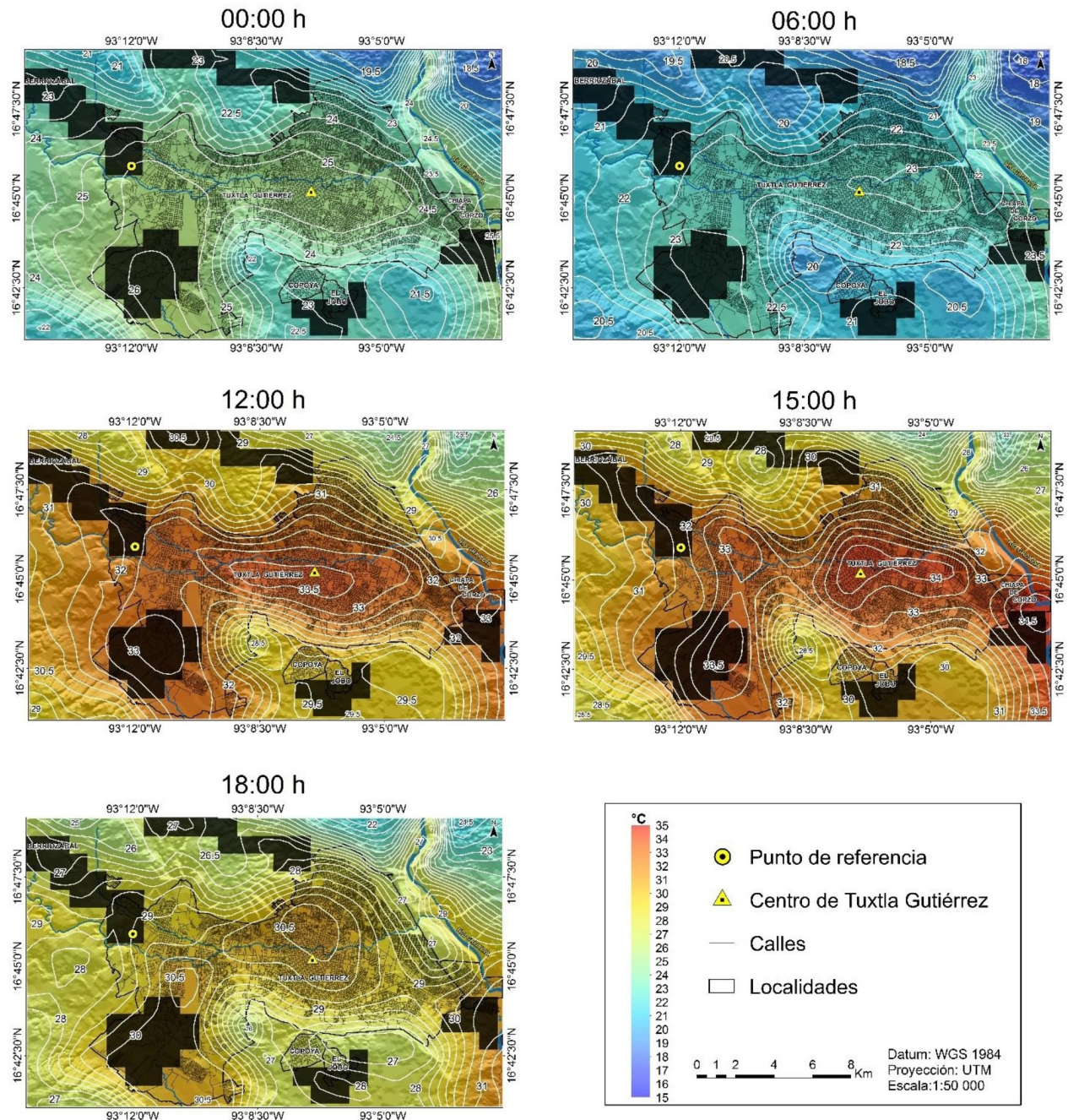


Figura 4. Mapa de temperatura del EEU a las 00:00 h, 06:00 h, 12:00 h, 15:00 h y 18:00 h. Los polígonos negros representan el crecimiento urbano asignado para el escenario. Las líneas blancas denotan las isotermas ($^{\circ}\text{C}$).

manera correcta la morfología urbana (dimensiones de las edificaciones y cobertura asfáltica), lo cual causa estas diferencias térmicas.

Para el 3 de mayo, se observa la presencia

y la magnitud de la ICU generada por la ciudad a diferentes horas del día, lo anterior como consecuencia de factores como la interacción térmica entre las propiedades del suelo, generado por los diferentes

materiales empleados en la infraestructura urbana (edificios, casas, calles, avenidas, entre otros) que presentan diferentes propiedades térmicas (admitancia térmica). Los cuales, por efectos de la radiación solar, durante el día retienen energía térmica y durante la noche la remiten en forma de calor (Oke *et al.* 2017). La temperatura de la zona urbana ubicada en el valle fue mayor que en las áreas urbanas montañosas; lo que puede indicar que las características geomorfológicas, debido al relieve tienen un papel preponderante en la distribución de la ICU al establecer pisos climáticos y barreras naturales que impiden el paso del viento. Al respecto, Bokwa *et al.* (2015) señalan que el componente tectónico es uno de los factores que favorece la diferenciación térmica en el espacio geográfico. Además de los flujos de calor antropogénico, debido a la energía calorífica generada en el proceso de combustión de los automóviles y otros procesos que emiten al ambiente grandes cantidades de energía calorífica, lo que produce incremento de la temperatura ambiente durante ese intercambio energético (Xie *et al.* 2016, Oke *et al.* 2017).

La simulación de la ICU puede llegar a tener intensidades que varían entre 0.5 y 2.5 °C; pero al considerar que el modelo subestimó las temperaturas en el centro de la ciudad, éstas podrían ser mayores o iguales a 5 °C pasado las 12:00 h. Este resultado coincide con lo observado en las ciudades de Tampico, Querétaro, Ciudad de México, Ciudad Juárez, Torreón, entre otras, lo que demuestra el efecto de la urbanización en el clima local (Fuentes 2014, 2015, Colunga *et al.* 2015, Ballinas y Barradas 2016, Salas-Esparza y Herrera-Sosa 2017, Flores-De la O *et al.* 2018).

Las áreas de vegetación que se encuentran en los alrededores de la ciudad tienen un papel importante al funcionar como reguladores de la temperatura, por lo que no se descarta que la ICU presente mayor intensidad y/o extensión al modificarse el uso de suelo. En este sentido, los resultados del EEU muestran que, al modificar el uso de suelo en los alrededores de la ciudad, las temperaturas se elevarían 0.5 °C en algunas zonas, en consecuencia, la ICU presente podría llegar a aumentar su exten-

sión e intensidad, lo cual, se haría más evidente a partir de las 12:00 h (Figura 4). Si se infiere que en el EEU el modelo subestimó las temperaturas en el centro de la ciudad de manera similar a lo observado en el escenario base, las temperaturas obtenidas tendrían un incremento mayor a 0.5 °C, por consiguiente, la ICU sería más severa. Lo que concuerda con lo indicado por Tran *et al.* (2017) y Amir *et al.* (2020). Por otra parte, las islas que se forman al poniente de la ciudad, podrían presentarse con mayor frecuencia pasadas las 12:00 h como resultado del crecimiento urbano, lo cual obedece a los cambios en los flujos de calor que se experimentarían en la región. Lo anterior coincide con Oke *et al.* (2017), quienes argumentan que la ICU se modificará como resultado de la expansión urbana, así como del incremento en la densidad de la infraestructura urbana.

En función de lo anterior, la expansión urbana que experimenta la ciudad como parte del desarrollo de la ZMTG, podría ocasionar diversas alteraciones al ambiente, que a su vez, derivarían en una serie de situaciones adversas para la población. La pérdida de vegetación no solo traería consigo un incremento de la intensidad y/o extensión de la ICU, sino otras problemáticas como la disminución del recurso hídrico y la modificación del patrón de precipitaciones en la región. En consecuencia, la protección y conservación de las Áreas Naturales Protegidas, así como la protección y creación de corredores biológicos, cobran un papel fundamental para evitar que se incremente la intensidad de la ICU y con ello, sus afectaciones. De igual manera, la presencia de parques urbanos, así como la reforestación de camellones y banquetas (Vázquez *et al.* 2016, Salas-Esparza y Herrera-Sosa 2017, Flores-De la O *et al.* 2018, Chun y Guldman 2018), además del empedrado de calles en lugar del concreto y del asfalto, modificarán de manera favorable el comportamiento de la ICU. Debido a que se espera que la intensidad de la ICU en Tuxtla Gutiérrez sea similar a aquellas reportadas para ciudades de mayores dimensiones, la realización de estudios más detallados que permitan entender el problema más a fondo, resultaría de gran interés en trabajos a futuro.

CONCLUSIONES

Los modelos numéricos constituyen una herramienta para entender los fenómenos atmosféricos. El modelo MM5 identificó la presencia de la ICU en Tuxtla Gutiérrez, como consecuencia de los flujos de calor generados por las diferencias en las propiedades del suelo, así como las características geomorfológicas de la ciudad. Los resultados muestran que la ICU puede tener intensidades de 0.5 a 2.5 °C, pero los datos observados en las estaciones meteorológicas indican que estas pueden ser mayores o iguales a 5 °C, situación que afectaría la zona centro de la ciudad. Los cambios de uso de suelo que

experimenta la ciudad como parte de su expansión, provocarán que la ICU aumente su extensión e intensidad. Por el desarrollo urbano de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, el estudio de la ICU es necesario para la evaluación e implementación de medidas de mitigación para evitar impactos mayores.

AGRADECIMIENTOS

Al Lic. Oscar Bernardino Jiménez y al Lic. Aldo Gómez Parada, por el apoyo brindado durante la simulación y generación de mapas.

LITERATURA CITADA

- Amir SM, Dongyun L, Li P, Rasool U, Ullah KT, Javaid AFT, Wang L, Fan B, Rasool MA (2020) Assessment and simulation of land use and land cover change impacts on the land surface temperature of Chaoyang District in Beijing, China. *PeerJ* 8: e9115. Doi: 10.7717/peerj.9115
- Ballinas M, Barradas V (2016) The urban tree as a tool to mitigate the urban heat island in Mexico City: simple phenomenological model. *Journal of Environmental Quality* 45: 157-166.
- Bokwa A, Hajto MJ, Walawender JP, Szymanowski M (2015) Influence of diversified relief on the urban heat island in the city of Kraków, Poland. *Theoretical and Applied Climatology* 122: 365-382.
- Bollo MM, Hernández SJR, Priego SA, Zaragoza ÁR, Ortiz RA, Espinoza MA, Ruíz LR (2015) Una propuesta de Regionalización físico-geográfica de México. Universidad Nacional Autónoma de México: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Morelia, Michoacán. 59p.
- CEIEG (2019) Mapas temáticos. Perfiles municipales. Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas. Chiapas, México. <http://www.ceieg.chiapas.gob.mx/home/informacion-geografica/?maccion=15>. Fecha de consulta: 3 de julio de 2019.
- Colunga ML, Cambrón-Sandoval VH, Suzán-Azpiri H, Guevara-Escobar A, Luna-Soria H (2015) The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro city, México. *Atmósfera* 28: 205-218.
- CONAGUA (2016) Información estadística climatológica. Comisión Nacional del Agua. México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>. Fecha de consulta: 4 de octubre de 2016.
- Chun B, Guldman JM (2018) Impact of greening on the urban heat island: Seasonal variations and mitigation strategies. *Computers, Environment and Urban Systems* 71: 165-176.
- Díaz-Nigenda E, Tatarko J, Morales-Iglesias H, Hernández MZ, Vázquez MW, Alatorre-Ibargüengoitia MA (2018) Measurement and modeling air quality impacts of dust emissions from unpaved roads in Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Geosciences* 8: 284. Doi: 10.3390/geosciences8080284
- Dudhia J, Gill D, Manning K, Wang W, Bruyere C (2005) PSU/NCAR Mesoscale modeling system tutorial class notes and users' guide (MM5 modeling system version 3). <http://www2.mmm.ucar.edu/mm5/>. Fecha de consulta: 14 de agosto de 2019.

- ESRI (2011) ArcGIS 10.1. Environmental Systems Research Incorporated. Environmental Systems Research Incorporated: Redlands, CA, USA. Recuperado de: <https://www.esri.com/es-es/home>. Fecha de consulta: 14 de agosto de 2019.
- Espinosa-Rodríguez LM, Torres-Pardo ND, Magaña-Lona D (2017) Cálculo de la peligrosidad y vulnerabilidad por inundaciones en el municipio de San Mateo Atenco, Estado de México. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias* 8: 20-39.
- Flores-De la O JL, Villanueva-Solis J, Quiroa-Herrera JA (2018) Evaluación de los efectos microclimáticos que tiene la vegetación en la mitigación de la isla de calor urbana. *Revista de Ciencias Ambientales* 52: 123-140.
- Fuentes CA (2014) Islas de calor urbano en Tampico, México. Impacto del microclima a la calidad del hábitat. *Nova Scientia* 7: 495-515.
- Fuentes CA (2015) Climatología urbana por modificación antropogénica. Alteración del balance de energía natural. Contexto. *Revista de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Nuevo León* 9: 73-91.
- Gaur A, Eichenbaum MK, Simonovic SP (2018) Analysis and modelling of surface urban heat island in 20 Canadian cities under climate and land-cover change. *Journal of Environmental Management* 206: 145-157.
- González D, Becerril-Piña R, Mastchi-Loza, CA, Cervantes M, Guevara A, Romo M, González E (2018) El riesgo de inundación suscrito a los cambios de usos de suelo de cuencas periurbanas. En: Rodríguez JM, Welsh CM, Romo M, Travieso AC (Eds) *Riesgo de desastres en México: Eventos hidrometeorológicos y Climáticos*. 1ª Edición. México. 427p.
- Grell GA, Dudhia J, Stauffer DR (1994) A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Meso-scale Model (MM5), (No. NCAR/TN-398+STR). University Corporation for Atmospheric Research. USA. 128p. <http://dx.doi.org/10.5065/D60Z716B>. Fecha de consulta: 14 de agosto de 2017.
- Henríquez C, Romero H (2019) *Urban climates in Latin America*. Springer Publishing. New York, Estados Unidos. 406p.
- INEGI (2014) Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250,000: Serie V. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 195p. https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/usuarios/metadatos/guia_interusuarios.pdf. Fecha de consulta: 17 de octubre de 2017.
- Lima GN, Magaña VO (2018) The urban growth of the metropolitan area of Sao Paulo and its impact on the climate. *Weather and Climate Extremes* 21: 17-26.
- Morales-Iglesias H, Priego SAG, Bollo MM (2017) Los paisajes físico-geográficos del estado de Chiapas, México a escala 1: 250 000. *Terra Digitalis, international e-journal of map* 1: 1-7.
- NCEP (2000) NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D6M043C6>. Fecha de consulta: 8 de febrero del 2018.
- Oke TR, Mills G, Christen A, Voogt JA (2017) *Urban climates*. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido. 546p.
- Salas-Esparza MG, Herrera-Sosa LC (2017) La vegetación como sistema de control para las islas de calor urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Hábitat Sustentable* 7: 14-23.

- SEDATU (2018) Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2015. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/305634/Delimitacion_Zonas_Metropolitanas_2015.pdf. Fecha de consulta: 12 de febrero de 2019.
- SGG (2017) Ley de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano del Estado de Chiapas. Secretaría General de Gobierno. <https://www.sgg.chiapas.gob.mx/legislacion/estatalleyes>. Fecha de consulta: 10 de julio de 2020.
- Silva M, García A, Hernando A (2015) Crecimiento de la mancha urbana en la Zona Metropolitana de Tuxtla Gutiérrez (Chiapas, México). *Quehacer Científico en Chiapas* 10: 35-41.
- Soto-Estrada E (2019) Estimación de la isla de calor urbana en Medellín, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 35: 421-434.
- Tran DX, Pla F, Latorre-Carmona P, Myint SW, Caetano M, Kieu HV (2017) Characterizing the relationship between land use land cover change and land surface temperature. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 124: 119-132.
- Vázquez MW, Jazcilevich A, García RA, Caetano E, Gómez G, Bornstein RD (2016) Influence of Green Roofs on Early Morning Mixing Layer Depths in Mexico City. *Journal of Solar Energy Engineering* 138: 061011. Doi: 10.1115/1.4034807
- Walpole RE, Myers RH, Myers SL, Ye K (2012) *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 9a. Edición. Editorial Pearson. México. 792p.
- Wicki A, Parlow E, Feigenwinter C (2018) Evaluation and modeling of urban heat island intensity in Basel, Switzerland. *Climate* 6: 55-80.
- Willmott CJ, Robeson SM, Matsuura K (2012) Short communication: A refined index of model performance. *International Journal of Climatology* 32: 2088-2094.
- Xie M, Liao J, Wang T, Zhu K, Zhuang B, Han Y, Li M, Li S (2016) Modeling of the anthropogenic heat flux and its effect on regional meteorology and air quality over the Yangtze River Delta region, China. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16: 6071-6089.
- Yao R, Wang L, Huang X, Zhang W, Li J, Niu Z (2018) Interannual variations in surface urban heat island intensity and associated drivers in China. *Journal of Environmental Management* 222: 86-94.