



Sociedad y Ambiente  
ISSN: 2007-6576  
sociadadyambiente@ecosur.mx  
El Colegio de la Frontera Sur  
México

# Comportamiento termopluiométrico en la zona metropolitana de Toluca: el deterioro ambiental de las ciudades

Vilchis Matal, Iván; Garrocho Rangell, Carlos Félix

Comportamiento termopluiométrico en la zona metropolitana de Toluca: el deterioro ambiental de las ciudades

Sociedad y Ambiente, núm. 18, 2018

El Colegio de la Frontera Sur, México

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=455757584006>

DOI: <https://doi.org/10.31840/sya.v0i18.1883>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional.

## Comportamiento termopluiométrico en la zona metropolitana de Toluca: el deterioro ambiental de las ciudades

Thermopluiometric Behavior in the Toluca Metropolitan Area: the Environmental Deterioration of Cities

Iván Vilchis MataI  
Universidad Autónoma del Estado de México, México  
ivilchis@cmq.edu.mx

DOI: <https://doi.org/10.31840/sya.v0i18.1883>  
Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=455757584006>

Carlos Félix Garrocho RangelII  
Universidad de Exeter, Reino Unido., México  
cfgarrocho@gmail.com

Recepción: 18 Abril 2018  
Aprobación: 03 Octubre 2018

### RESUMEN:

Conocer el sistema climático en el entorno urbano es fundamental para avanzar en la comprensión del proceso de calentamiento en las ciudades. El objetivo del trabajo es examinar el comportamiento termopluiométrico en la zona metropolitana de Toluca (ZMT) para el periodo 1960-2009, partiendo de tendencias espaciotemporales de dos variables: temperatura y precipitación. El método se fundamenta en la prueba estadística no-paramétrica *Mann-Kendall*, instrumentada en ambiente de Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que permite identificar tendencias importantes de variabilidad climática atribuibles al deterioro ambiental. En el periodo estudiado, la temperatura se incrementó 0.61 °C y la precipitación 92.10 mm, ambas por encima de los promedios a lo largo de medio siglo. Estos datos pueden demostrar la influencia de las ciudades como agentes modificadores del sistema climático regional-metropolitano, en un contexto de cambios ambientales locales y globales. Por tanto, las ciudades ofrecen oportunidades que requieren atención y soluciones de empoderamiento con enfoque sostenible, así como de mitigación y adaptación en múltiples esferas de actividad y a diversas escalas espaciotemporales. Como se demuestra en este texto, el régimen termopluiométrico trasciende estratégicamente como *indicador-nodo* que interconecta los contextos ambiental, económico y social, en el marco climático de deterioro, en parte inducido por áreas urbanas.

**PALABRAS CLAVE:** comportamiento termopluiométrico, deterioro ambiental, ciudad, clima urbano, desarrollo sostenible.

### ABSTRACT:

Knowing the climate system in the urban environment is essential to advancing understanding of the warming process in cities. The purpose of this paper is to examine the thermopluiometric behavior in the Metropolitan Zone of Toluca (ZMT) for the period 1960-2009, based on the spatio-temporal trends of two variables: temperature and precipitation. The method is based on the Mann-Kendall non-parametric statistical test, instrumented in the Geographic Information Systems (GIS) environment. Major climatic variability trends attributable to environmental deterioration are identified. In the period studied, the temperature increased by 0.61 °C and precipitation by 92.10 mm, both above the average for the past half century. These data can demonstrate the influence of cities as modifying agents of the regional-metropolitan climate system, within a context of local and global environmental changes. Accordingly, cities offer opportunities that require attention and empowerment solutions with a sustainable approach, as well as mitigation and adaptation in multiple spheres of activity and at various spatio-temporal scales. As demonstrated in this text, the thermopluiometric regime strategically transcends as a node-indicator that interconnects environmental, economic and social contexts, within the climate framework of deterioration, partly induced, by urban areas.

**KEYWORDS:** thermopluiometric behavior, environmental deterioration, city, urban climate, sustainable development.

### INTRODUCCIÓN

La investigación ambiental ha priorizado la escala global o macrorregional sobre la escala urbana o metropolitana (escala *micro*) (MEA, 2005).<sup>1</sup> Este trabajo busca, justamente, contribuir a paliar este desbalance y se enfoca a analizar la variabilidad climática *local* en la zona metropolitana de Toluca (ZMT), con el fin de comprender mejor el calentamiento en las ciudades, en el contexto del deterioro ambiental y

la crisis actual de sostenibilidad (UNEP, 2016).<sup>2</sup> La premisa inicial de nuestro planteamiento es que las ciudades son agentes modificadores del sistema climático regional-intraurbano (i.e. local), que actúan en un entorno de cambios ambientales globales (CICS/UNESCO, 2013). Por razones metodológicas requerimos hacer un corte de escalas espaciotemporales, ya que sería inviable adoptar una visión holística. Por tanto, la investigación se enfoca en las escalas meso y micro en la zona metropolitana de Toluca (ZMT). Al enfocarnos a las escalas meso y micro que, además, son metropolitanas, podemos decir que se trata de un estudio de escalas *meso-metropolitanas*.

El objetivo de este trabajo es examinar el comportamiento termoplumiométrico en la ZMT para el periodo 1960-2009, a partir de las tendencias de dos variables: *temperatura* y *precipitación*. Con particular interés en dos temas: *i*. Identificar la incidencia espaciotemporal de los comportamientos climáticos de la ZMT; y, *ii*. Correlacionar factores de deterioro ambiental en la transición a un nuevo estado de variación atmosférica en la ciudad (que tienen importantes implicaciones socioeconómicas para su desarrollo), con el fin de incrementar la capacidad de anticipación, adaptación/mitigación de la ZMT ante variaciones climáticas rápidas e inesperadas.<sup>3</sup> Al lograr el objetivo, esperamos demostrar que el régimen termoplumiométrico es un *indicador-nodo* que interconecta los contextos ambiental, económico y social, ante el riesgo climático inducido por las áreas urbanas.

El trabajo se divide en cinco secciones. En la primera, se revisan fenómenos atmosféricos que determinan el sistema climático, ya que la alteración de sus variables por actividades antrópicas pueden incidir en el calentamiento local y global, así como en el contexto ambiental, económico y social local de las ciudades. En la segunda sección se interrelacionan las variables ciudad y clima a escalas macro, meso y micro. Esta interrelación es multidimensional, ya que incide en la variación y distribución espaciotemporal de las condiciones atmosféricas a diversas escalas. En esta investigación se pone especial atención a las islas de calor y de precipitación, en el marco meso-microclimático de la ZMT.

En la sección tres, se presentan las fuentes de información y se explica el método utilizado en el análisis empírico, que incluye cuatro ejes: el primero se diseñó para analizar la serie de datos (1960-2009) de temperatura y precipitación en espacio y tiempo; el segundo para mostrar los perfiles de tendencias (regresión lineal) de decremento e incremento de los datos termoplumiométricos; el tercero para modelar las tendencias espaciotemporales (mediante la técnica *Mann-Kendall Tau*) en un ambiente de Sistemas de Información Geográfica (SIG: IDRISI-Selva), y el cuarto eje, relaciona los multifactoriales de transición a un nuevo estado de variación termoplumiométrica. En la cuarta sección se discuten los principales resultados por eje. Finalmente, en la sección cinco se sintetizan los principales hallazgos y aportes del trabajo. El texto cierra con un listado de la bibliografía consultada.

## ELEMENTOS PRELIMINARES

En la historia geológica del planeta se han producido numerosos y drásticos cambios climáticos de amplia duración. Se sabe que han ocurrido tanto periodos glaciares como periodos extremadamente cálidos, algunos de ellos hace no mucho tiempo. Por ejemplo, la llamada *Pequeña Edad de Hielo* fue un periodo frío en el hemisferio norte que se inició en el siglo XIV y duró hasta mediados del siglo XIX, o como el periodo conocido como óptimo climático medieval que fue notablemente caluroso, también en el hemisferio norte, que comenzó en el siglo X y llegó hasta el siglo XIV (Diamond, 2007). La particularidad de estos periodos de cambio drásticos en el clima es que se derivaron de *causas naturales* (e.g. actividad solar, ciclos orbitales, actividad volcánica). Es decir: los cambios climáticos no son una novedad. Sin embargo, lo que sí es nuevo en la actualidad, es la atribución dominante del calentamiento global a *causas antrópicas* (e.g. ciertos desarrollos tecnológicos: automotores e instalaciones que generan altas emisiones de CO<sub>2</sub>, agricultura y ganadería industrializada).<sup>4</sup> El origen antrópico de cambios acelerados en ciertas variables como la temperatura y la

precipitación en el sistema climático global, es convencionalmente referido como *cambio climático* (IPCC/OMM/PNUMA, 2013; Martín-Vide, 2017, Molina *et al.*, 2017).

El cambio del clima en nuestro planeta se está produciendo a un ritmo mayor al de su evolución natural, principalmente por efectos de la radiación solar que está elevando las temperaturas (Molina *et al.*, 2017). Este *calentamiento global por causas antrópicas*, puede afectar el clima de manera irreversible.<sup>5</sup> En conjunto, el uso de combustibles fósiles, diversas actividades industriales, económicas y agrícolas, la deforestación y el crecimiento poblacional, han incrementado las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y su acumulación en la atmósfera (Bruckman y Ramos, 2009; Díaz y Aldaz, 2017). Su permanencia puede durar años o incluso siglos, lo cual plantea problemas de justicia con las generaciones venideras. Adicionalmente, los impactos ocasionados por el cambio ambiental global son cada vez más evidentes a todas las escalas espaciotemporales, sin distinción de grupos sociales (Ángel *et al.*, 2010; CICS/UNESCO, 2013).<sup>6</sup>

El actual periodo geológico denominado Antropoceno (del griego *ἄνθρωπος* *anthropos*, “ser humano”, y *καινός* *kainos*, “nuevo”), sitúa a la humanidad (de manera individual y colectiva) como fuerza determinante del funcionamiento y alteración sustancial del clima a escala global.<sup>7</sup> Los cambios climáticos son producto de intrincados mecanismos de causalidad, donde las concentraciones globales de GEI se distribuyen en espacio y tiempo de manera independiente al lugar donde fueron generados. Son de tal intensidad, que el entorno no los puede absorber adecuadamente mediante los mecanismos naturales que mantenían en equilibrio la composición química de la atmósfera, antes de la acción del hombre (Crutzen y Stoermer, 2006, Molina *et al.*, 2017).

Por tanto, el problema del calentamiento global antrópico no ocurre de manera aislada del entorno, sino como un sistema complejo de interconexiones, retroalimentaciones y evolución discontinua, que vincula múltiples procesos interdependientes causa-efecto en las dimensiones ambiental, económica y social, tanto en el espacio (local, regional, mundial) como en el tiempo (pasado, presente y futuro) (CICS/UNESCO, 2013).

El clima desempeña un papel fundamental en la construcción de un entorno sostenible ya que determina la naturaleza, variación y efectos de las variables meteorológicas (e.g. temperatura y precipitación), que, a su vez, inciden en el contexto ambiental, económico y social. Por tanto, a escala micro, las ciudades representan un medio local de incremento rápido de presión de recursos (i.e. demanda de bienes y energía) y de modificación de condiciones atmosféricas en su espacio geográfico, que luego se regionalizan y globalizan (Emmanuel, 2011; Gil y Olcina, 2017).

En este sentido, la magnitud de transformación de sistemas naturales a sistemas artificiales (ciudades), alteran los mecanismos naturales de regulación ambiental. El deterioro ambiental de esta compleja sinergia entre sociedad y medio ambiente desequilibra el sistema climático urbano y contribuye a catalizar la producción de nuevas amenazas e impactos potenciales de riesgo climático por episodios meteorológicos extremos, amplificados y recurrentes (e.g. olas de frío y calor, sequías, inundaciones, tornados) (Mitchell, 1994). Esta tendencia de ajuste de los sistemas naturales ligados con las actividades y modelos de desarrollo económico y social, se orienta a un inminente resultado: *la multiplicación de la vulnerabilidad y la agudización de la pobreza* (Castro, 2011; López Soria, 2015).

Aquí resulta relevante recurrir a lo que Raworth (2012) denomina “espacio seguro y justo para la humanidad”. Éste es el espacio circunscrito por los límites planetarios y sociales dentro de los cuales la humanidad puede seguir prosperando sin poner en peligro la resiliencia de la Tierra, y el bienestar y la seguridad de sus habitantes actuales y venideros (Figura 1). Es decir, que la percepción y resolución de la problemática ambiental en el continuo local-global, debe tender a la sostenibilidad, al manejo precautorio de riesgos y a la reducción de impactos ambientales de la producción de bienes, como fórmula vinculante entre las dimensiones ambiental, económica y social.<sup>8</sup>

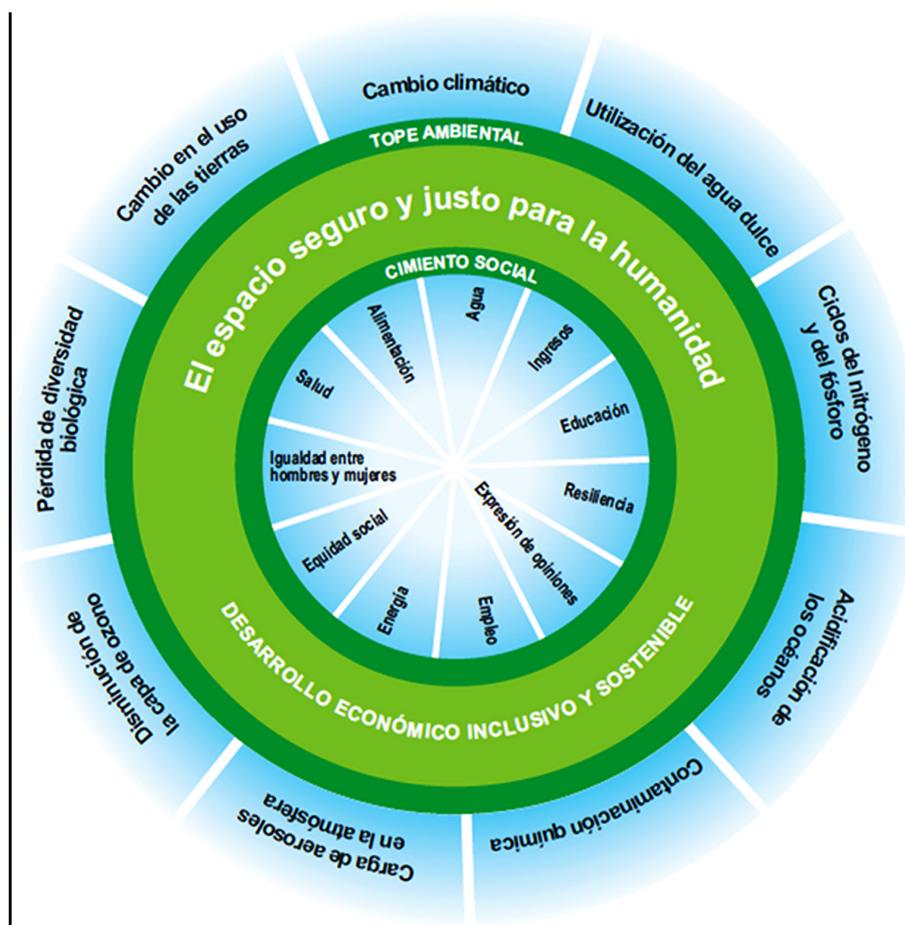


FIGURA 1  
Espacio seguro y justo para la humanidad

Fuente: adaptado de Raworth (2012).

## CIUDAD Y CLIMA: INTERRELACIONES MUTUAS

Las ciudades son un complejo conjunto de fuentes de emisión de calor. La variación y distribución espaciotemporal de las emisiones caloríficas en las áreas urbanas depende de incrementos térmicos por la absorción y emisión de radiación desde la superficie, debidos, fundamentalmente, a los factores siguientes: *i*. Usos del suelo y creciente densidad de población y edificaciones; *ii*. Intensidad de las actividades económicas, industriales y habitacionales; *iii*. Magnitud del parque vehicular y tipos de sistemas de transporte; *iv*. Topografía; *v*. Disminución de áreas verdes, y *vi*. Emisión de GEI (García Codrón *et al.*, 2004; Alexandre *et al.*, 2013).

La configuración y expansión de las ciudades generan condiciones climáticas diferenciadas en su entorno atmosférico, y en sus áreas periurbanas y rurales.<sup>9</sup> La influencia de los espacios urbanos sobre la dinámica y estado del tiempo atmosférico ejerce una alteración significativa en los elementos del clima, por lo que la ciudad representa un factor multidimensional clave en el estudio del cambio ambiental local y global (Grimmond, 2007; Blake *et al.*, 2011; Hebbert, 2014; Georgescu *et al.*, 2014; Miguel Velasco *et al.*, 2017; Tol, 2017).

El *microclima urbano* es producto de la modificación antrópica del clima debido, entre otros factores, al aumento de población, la superficie urbanizada y las actividades (Lombardo, 1997; Romero Lankao, 2007; Fernández, Galán y Cañada, 2012; Ferrelli *et al.*, 2017). Las ciudades son las principales emisoras de CO<sub>2</sub> a

la atmósfera (Velasco y Roth, 2010, Molina *et al.*, 2017). A mayor transformación de superficie natural por superficie asfaltada y edificaciones, mayor el incremento de la temperatura local (Román *et al.*, 2017). Esto modifica el balance energético (interacción entre la superficie terrestre y la atmósfera), destacando el tipo de superficie (e.g. rugosidad, cobertura, capacidad térmica) y la generación térmica diferenciada por fuentes de combustión, desaceleración de enfriamiento por edificios e impurezas atmosféricas (Oke, 1987; Foken, 2008; Contreras Cardosa *et al.*, 2008; Moreno García y Serra Pardo, 2017; Zhong *et al.*, 2017). La cubierta vegetal favorece la regulación de la temperatura superficial y su disminución favorece el calentamiento (Jáuregui, 1990; 1995; Wong y Yu, 2005; Capelli de Steffens *et al.*, 2006; Goetz *et al.*, 2007). Cambios microclimáticos modifican las condiciones hidrológicas e hidrometeorológicas, lo que incrementa el riesgo y la vulnerabilidad en las ciudades (Shepherd *et al.*, 2002; Mote *et al.*, 2007; Quereda Sala *et al.*, 2007; WMO/GWP, 2008; Huong y Pathirana, 2013). Todo esto significa que la intervención de actores sociales urbanos resulta clave para avanzar en la mitigación y adaptación ante la variabilidad del clima, como prioridad para el desarrollo de las ciudades y su entorno (Oltra *et al.*, 2009; CICS/UNESCO, 2013).

Como resultado de la expansión urbana y la transformación de la ciudad (e.g. la sustitución progresiva de la cubierta natural por tejido urbano), se eleva la temperatura *al interior* de la ciudad. Esto produce microclimas urbanos bajo procesos no climáticos, como el efecto de contraste térmico urbano denominado *isla de calor (urban heat island)*, que es un fenómeno nocturno que se acentúa al amanecer y cuyo flujo usualmente converge hacia el centro de la ciudad. Las islas de calor urbanas tienen diversas consecuencias por las variaciones climáticas que generan: provocan cambios adaptativos de especies animales y vegetales, modifican el calendario fenológico, incrementan el consumo de energía (sobre todo en verano), afectan el patrimonio monumental y arquitectónico, minan el confort climático en las noches de verano, elevan el estrés térmico, incrementan la morbilidad y la mortalidad humana, especialmente entre los adultos mayores (Martín-Vide, 2017). La intensidad de las islas de calor se relaciona directamente con el tamaño de la ciudad (Jáuregui y Heres, 2008).

No sólo las dimensiones de la ciudad afectan la generación e intensidad de islas de calor, también la *morfología urbana* tiene implicaciones importantes. Por ejemplo: produce calor antrópico derivado de actividades y modelos de crecimiento económico concentrado y sistemas de transporte que alteran la composición atmosférica; afecta la absorción de radiación solar y el almacenamiento de calor durante el día, debido a la alta capacidad calorífica de los materiales de construcción de la geometría urbana; disminuye la pérdida de calor por la reducción de la velocidad del viento; altera el balance de radiación (entrada y salida de energía) debido a incrementos térmicos por reemisiones de radiación hacia una atmósfera usualmente contaminada (efecto invernadero); obstruye las edificaciones y el pavimento, cuya pérdida de energía térmica (intercambios de calor, masa y momento) dependen de la profundidad, materiales de construcción y angostura de los denominados cañones urbanos; incide en la concentración espacial de las Islas de Calor en zonas de mayor actividad humana e infraestructura urbana, que pueden incrementar la temperatura hasta en 7.0 grados centígrados en promedio, en urbes con población de un millón de habitantes (Martín-Vide, 2017).

Otro fenómeno climático que produce la ciudad son las denominadas *islas de precipitación*, que son un efecto directo del ciclo hidrológico por la presencia de partículas contaminantes y el calor generado por las ciudades. Una atmósfera más caliente, mantiene mayor cantidad de vapor de agua, lo que favorece mecanismos de formación de nubes (de tipo convectivo) que producen lluvia. Estas modificaciones se reflejan en la cantidad y formas de precipitación, con tendencia cada vez más recurrente a registrar mayor intensidad y menor frecuencia (Jáuregui *et al.*, 1991; Molina *et al.*, 2017).

El ciclo hidrológico se compone, entre otros elementos, de la evaporación y la precipitación, cuya distribución espacial y temporal es heterogénea. El agua atmosférica es un factor modulador del clima, donde la variable meteorológica de mayor importancia es la precipitación (IPCC/OMM/PNUMA, 2013). Las islas de precipitación afectan el adelanto o retraso del periodo de lluvias y la intensidad de las precipitaciones,

que son una de las principales causas de disminución en la disponibilidad de agua o de inundaciones urbanas (Landa *et al.*, 2008).

Las condiciones extremas de temperatura y precipitación en el espacio y en el tiempo alteran la disponibilidad de agua, que es clave para la seguridad hídrica de las ciudades. La baja disponibilidad de agua en numerosas áreas urbanas del mundo (e.g. varias de las grandes ciudades de México) es agravada por los incrementos de la temperatura. Se estima que un aumento de temperatura en 2 °C puede derivar en una disminución de hasta 15 % en la disponibilidad de agua (Austria y Gómez, 2007; Landa *et al.*, 2008).

Por tanto, si el clima afecta la disponibilidad de agua, no es exagerado afirmar que el clima es un elemento estratégico para el éxito o fracaso de las ciudades, de su población, de sus actividades. El incremento y variabilidad de condiciones de temperatura y precipitación en las ciudades y sus regiones (debido a la estructura y procesos urbanos) representan un enorme desafío ambiental, de riesgo, de salud pública y de seguridad hídrica (Sjögersten *et al.*, 2013; Díaz y Aldaz, 2017; Landa *et al.*, 2008).

Conocer la variación espaciotemporal y los valores extremos de las variables climáticas (i.e. temperatura y precipitación) en la ciudad, plantea oportunidades y desafíos en el modelado y la proyección climática. La disponibilidad de buenos modelos climáticos reduce la incertidumbre y facilita planear y coordinar acciones de gestión, administración y mejoramiento del clima a escala intraurbana, urbana-metropolitana y regional (Jaramillo y Nazemi, 2017)

## EL CONTEXTO CLIMÁTICO DE LA ZMT: ESCALAS MACRO, MESO Y MICRO

A escala *macro*, la ubicación de México (i.e. latitud, inclinación del eje de la Tierra y estratigrafía de la atmósfera) provoca que reciba mayor radiación que otras regiones, calentándose de manera diferencial por la influencia de los océanos que rodean al país y la geomorfología de su territorio, que en conjunto generan un clima de tipo monzónico caracterizado por dos estaciones: un invierno seco y un verano lluvioso, pero también una amplia variedad de microclimas (Molina *et al.*, 2017).

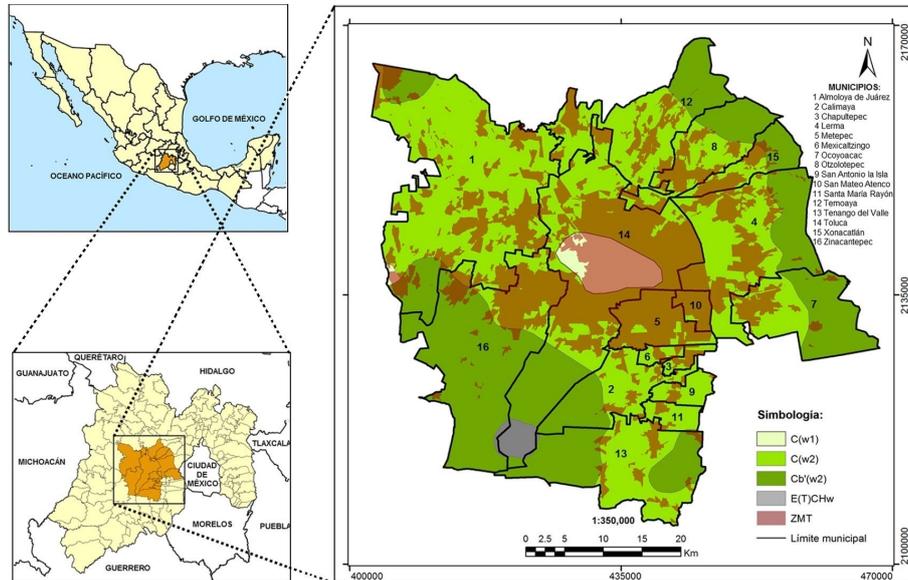
A escala *macromeso*, la dinámica atmosférica en México está asociada principalmente con ciertas estructuras meteorológicas, destacándose la zona intertropical de convergencia (ZITC), el monzón mexicano y las ondas del este, lo que favorece la generación de huracanes. Adicionalmente, se registran fenómenos climáticos relevantes, como la ocurrencia de El Niño(a), que se relacionan con el calentamiento-enfriamiento del Pacífico oriental ecuatorial. En presencia de El Niño los veranos tienden a presentar lluvias por debajo de lo normal y sequías, mientras que con La Niña se retorna a condiciones normales o a lluvias por arriba de lo normal. Estos fenómenos pueden casar inundaciones severas. Aunque el fenómeno es recurrente, sus ciclos son erráticos y van de dos a ocho años. Los fenómenos mencionados, y otros de menor importancia, favorecen la formación de huracanes en costas mexicanas, que inciden en la dinámica ambiental regional y se constituyen como una de las principales fuentes de agua para nuestro país (Magaña, 1999). Así, la ZMT con base en García y CONABIO (1998) registra cuatro tipos básicos de clima en el espacio meso-micropolitano, destacando que la zona urbana se asienta en los dos tipos de clima templado (Figura 2):

1. C(w1): Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura media del mes más frío entre -3 °C y 18 °C, y temperatura del mes más caliente debajo de 22 °C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm, lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55, y porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual;

2. C(w2): Muy similar al C(w1). Sólo varía el índice P/T que es mayor a 55;

3. Cb'(w2): Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5 °C y 12 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C, temperatura del mes más caliente debajo de 22 °C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2 % del total anual, y

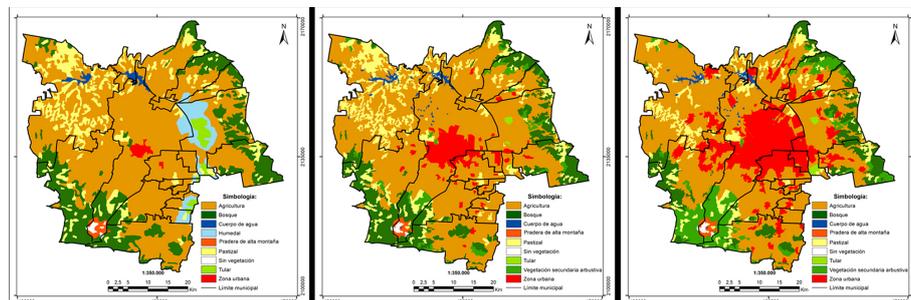
4. E(T)CHw: Frío, temperatura media anual entre -2 °C y 5 °C, temperatura del mes más frío de 0 °C y temperatura del mes más caliente entre 0 °C y 6.5 °C. Con lluvias de verano.



**FIGURA 2**  
**Tipos de clima en la Zona Metropolitana de Toluca**

Fuente: elaboración propia, con base en la clasificación de Köppen, modificado por García y CONABIO (1998).

A escala *meso-metropolitana*, estas alteraciones del tiempo atmosférico se reproducen al interior de las ciudades, formando *islas de calor*, que generan en la época de lluvias un incremento diferenciado de alta humedad (*islas de precipitación*) (Morales *et al.*, 2007). Nuestra zona de estudio, la ZMT registra ciertas particularidades geográficas y atmosféricas que vale la pena destacar: posee una rápida ventilación y dispersión de energía calorífica, alta insolación, elevada altitud, y convergencia de fenómenos atmosféricos tropicales y fríos. Sin embargo, parece que esto está cambiando. Debido a las alteraciones en las condiciones del acuífero y de los cuerpos de agua superficiales, la disminución de humedales y vegetación, el acelerado crecimiento poblacional, la explosiva expansión urbana, la contaminación atmosférica, el decremento de vegetación natural por procesos de deforestación, y los cambios del uso del suelo rural a urbano, entre otros (Figura 3) (Vilchis-Mata, *et al.*, 2018a).



**FIGURA 3**  
**Contextos de deterioro ambiental en ZMT (1960-2009)**

Fuente: elaboración propia con datos de CONABIO e INEGI.

## METODOLOGÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

Explorar sistemáticamente el comportamiento termopluiométrico del entorno geográfico de la ZMT (conformada por 16 municipios) comprendió el análisis espaciotemporal de las variables atmosféricas *temperatura* (máxima, mínima y promedio) y *precipitación*.<sup>10</sup> Los datos se tomaron de los reportes diarios generados por el *CLimate COMputing Project* (CLICOM), provenientes de estaciones meteorológicas automáticas y tradicionales administradas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). El periodo de estudio va de 1960 a 2009: cincuenta años son suficientes para apoyar los objetivos de este trabajo. La información se procesó en ambiente de Sistemas de Información Geográfica (SIG IDRISI-Selva), con el apoyo de la herramienta *Earth Trends Modeler* (ETM). Los cuatro ejes principales del análisis son los siguientes:

*Primer eje: Construcción de la serie de datos.* Calcular las medias mensuales e interanuales para cada variable: temperatura máxima (abril-mayo), temperatura mínima (diciembre-febrero), temperatura promedio (anual) y precipitación (acumulada mayo-octubre), a partir de datos diarios de las estaciones meteorológicas con periodos concomitantes (más de 30 años). Posteriormente generar y espacializar series cronológicas mediante superficies continuas (interpolación) tipo raster.

*Segundo eje: Análisis de tendencias climáticas.* Generar perfiles para conocer la sensibilidad de las tendencias (e.g. la pendiente de las rectas de regresión que sintetizan los datos) mediante una *regresión lineal* de mínimos cuadrados y vislumbrar incrementos o decrementos de cada variable por unidad de tiempo.

*Tercer eje: Modelar tendencias climáticas.* Evaluar en la escala micropolitana la consistencia de tendencia monotonía entre los valores de cada pixel bajo una prueba de correlación no-paramétrica *Mann-Kendall Tau* ( $\tau$ ). El propósito es identificar áreas con frecuencias relativas significativas de incremento o decremento (concordancia-discordancia). El rango de variación va de -1.0 a 1.0. Si es positivo indica que la tendencia de la variable se agudiza *a lo largo del tiempo*; si es igual a cero la variable tiende hacia la estabilidad (la variable no aumenta ni disminuye), y si es negativo indica que la tendencia de la variable se suaviza a lo largo del tiempo. Formalmente, esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signo} (x_i - x_j) \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\text{signo} (x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{Si } x_i - x_j > 0 \\ 0 & \text{Si } x_i - x_j = 0 \\ -1 & \text{Si } x_i - x_j < 0 \end{cases} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$n$  = longitud de la serie de datos

$x_i - x_j$  = observaciones en el tiempo  $i$  y  $j$  respectivamente

Finalmente, se calcula la medida de correlación entre dos variables correspondiente a tau ( $\tau$ ), obteniendo valores crecientes o decrecientes, en un rango de -1.0 a 1.0.

$$\tau = \frac{2S}{n(n-1)}$$

(Ec. 3)

Consideramos para la representación espacial de las variables un intervalo de confianza de 95 %, suficiente para minimizar la presencia de errores estocásticos.

*Cuarto eje: Relaciones multifactoriales.* Correlacionar las evidencias de variación y tendencia termoplumiométrica, con diversos factores de incidencia de cambios que condicionan la transición de la ZMT a un nuevo estado crítico negativo de vulnerabilidad climática.

## RESULTADOS

### Eje 1. Construcción de la serie de datos

El objetivo es preparar y confeccionar una base realizando un filtrado y control de calidad de datos termoplumiométricos, evitando inferencias e interpretaciones erróneas derivadas de la naturaleza de la infraestructura de su adquisición. Esta base de datos fue la fuente de entrada de los diversos procesos analíticos de este trabajo. Las principales acciones que se realizaron fueron las siguientes:

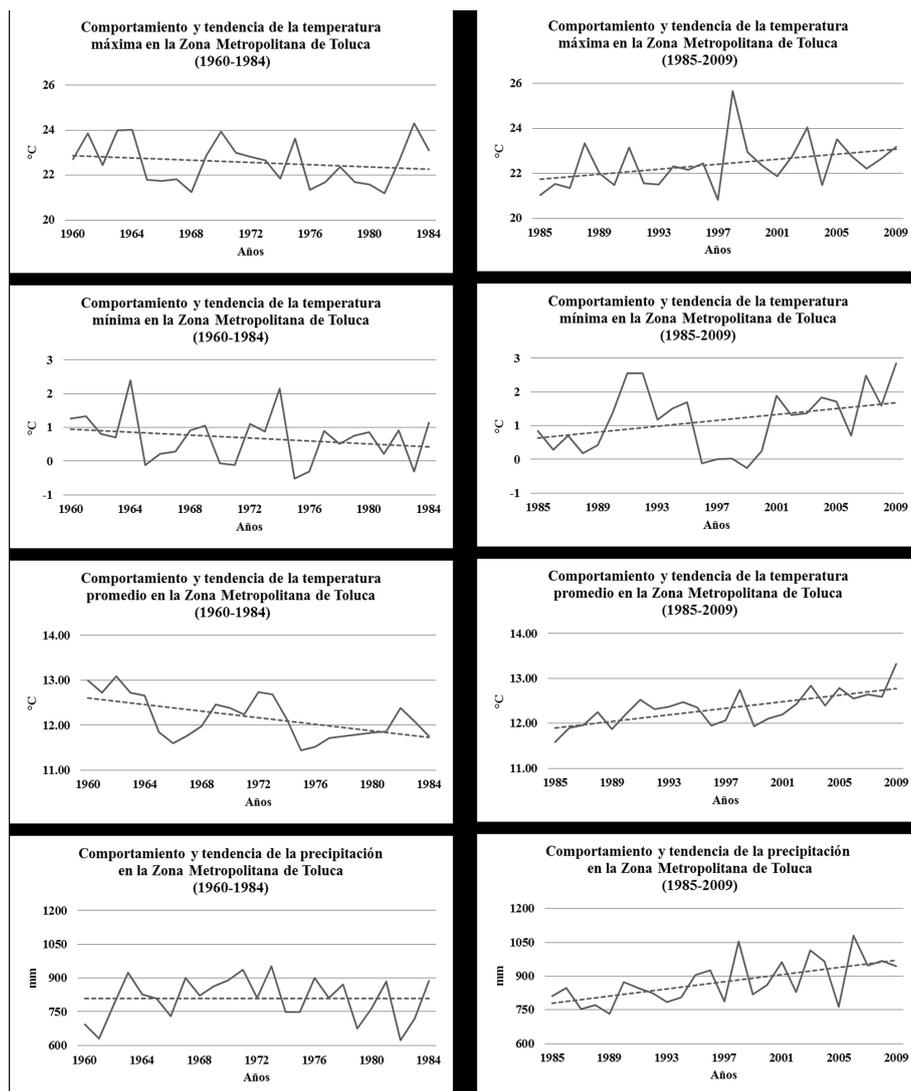
1.1 Obtener las medias mensuales e interanuales de las variables: temperatura máxima (T<sub>max</sub> en °C meses de abril-mayo), temperatura mínima (T<sub>min</sub> en °C diciembre-febrero), temperatura promedio (T<sub>prom</sub> en °C anual) y precipitación (P en mm acumulada mayo-octubre).

1.2 Espacializar los valores individuales de cada variable en series cronológicas de superficies continuas tipo raster (resolución espacial de 200 m), utilizando la función de interpolación (*interpol*) del SIG IDRISI-Selva.

1.3 Elaborar series de tiempo (*time series file*) con 612 imágenes por cada variable para su incorporación en las distintas técnicas de análisis y funciones dentro del módulo *ETM* del SIG IDRISI-Selva.

### Eje 2: Análisis de tendencias climáticas

El objetivo es mostrar de manera global el comportamiento termoplumiométrico con base en los perfiles de tendencias (regresión lineal) de decremento e incremento de los datos observados. Nuestra hipótesis es que el comportamiento del régimen termoplumiométrico se relaciona con el impulso del proceso de crecimiento urbano de la ZMT. Para su exploración se distinguen a mayor detalle y en dos fases las tendencias: a) de decremento, de 1960 a 1984; y b) de incremento, de 1985 a 2009, representadas en la Figura 4.



**FIGURA 4**  
**Comportamiento del régimen Turbopluiométrico en la ZMT**

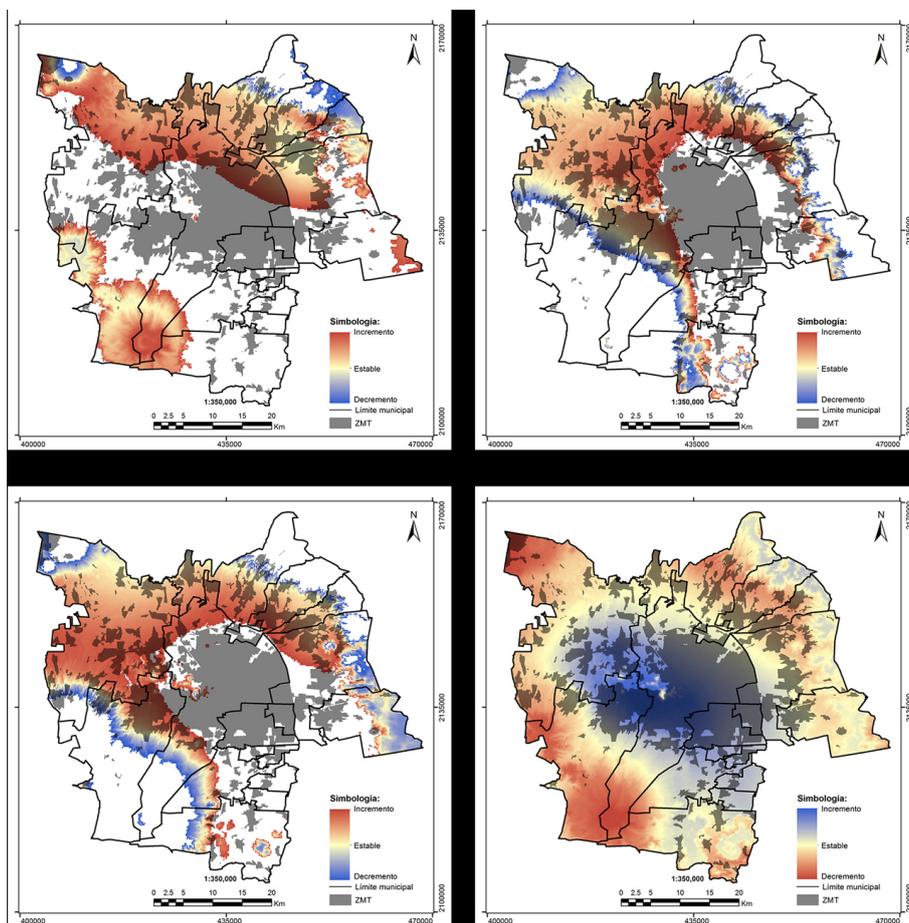
Fuente: elaboración propia con base en datos del CLICOM.

El comportamiento de la variable temperatura máxima para el periodo 1960-1984 se caracteriza por un decremento tendencial por debajo del promedio del orden de  $1.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ , representando una tasa de decremento anual de  $-0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con oscilación térmica de  $3.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y valores que fluctúan entre  $21.20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $24.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Aun presentando 13 años con las temperaturas máximas más elevadas (1960, 1961, 1963, 1964, 1969, 1970, 1971, 1972, 1973, 1975, 1982, 1983 y 1984). En contraste, el periodo 1985-2009 registra un incremento tendencial por arriba del promedio del orden de  $3.27\text{ }^{\circ}\text{C}$ , una tasa de incremento anual de  $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ , oscilación térmica de  $4.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y valores que fluctúan entre  $20.83\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $25.68\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Con presencia de 10 años con las temperaturas más elevadas (1988, 1991, 1998, 1999, 2002, 2003, 2005, 2006, 2008 y 2009).

La variable temperatura mínima para el periodo 1960-1984 muestra un decremento tendencial por debajo del promedio del orden de  $1.71\text{ }^{\circ}\text{C}$ , representando una tasa de decremento anual de  $-0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con oscilación térmica de  $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y valores que fluctúan entre  $-0.51\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $2.39\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Presentando 10 años con las temperaturas mínimas más bajas (1965, 1966, 1967, 1970, 1971, 1975, 1976, 1978, 1981 y 1983). En contraste el periodo 1985-2009 con incremento tendencial por arriba del promedio del orden de  $1.69\text{ }^{\circ}\text{C}$ , una tasa de incremento anual de  $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ , oscilación térmica de  $3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y valores que fluctúan entre  $-0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $2.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Presentando ocho años con las temperaturas mínimas más bajas (1986, 1988, 1989, 1996, 1997, 1998, 1999 y 2000).

Respecto a la variable temperatura promedio para el periodo 1960-1984 se observa un decremento tendencial por debajo del promedio del orden de  $0.93\text{ }^{\circ}\text{C}$ , representando una tasa de decremento anual de  $-0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con oscilación térmica de  $1.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y valores que fluctúan entre  $11.45\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $13.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ , bajo una amplitud térmica de  $24.83\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Con quince años por debajo del promedio (1965, 1966, 1967, 1968, 1971, 1974, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1983 y 1984). En contraste el periodo 1985-2009 con incremento tendencial por arriba del promedio del orden de  $0.98\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tasa de incremento anual de  $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ , oscilación térmica de  $1.73\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y valores que fluctúan entre  $11.59\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $13.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ , bajo una amplitud térmica de  $25.93\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Con 10 años por debajo del promedio (1985, 1986, 1987, 1989, 1990, 1996, 1997, 1999, 2000 y 2001).

Finalmente la variable precipitación durante el periodo 1960-1984 mantiene una tendencia acumulada en relativo equilibrio con  $143.94\text{ mm}$  por arriba del promedio, representando una tasa de incremento anual de  $5.76\text{ mm}$ , y valores que fluctúan entre  $621.97\text{ mm}$  y  $951.81\text{ mm}$ . Identificando sequía intraestival en 10 años (1960, 1961, 1962, 1966, 1974, 1975, 1979, 1980, 1982 y 1983). Sin embargo, el periodo 1985-2009 muestra un incremento tendencial acumulado por arriba del promedio del orden de  $206.58\text{ mm}$ , con una tasa de incremento anual de  $8.26\text{ mm}$ , y valores que fluctúan entre  $731.84\text{ mm}$  y  $1081.90\text{ mm}$ . Identificando sequía intraestival en 6 años (1987, 1988, 1989, 1993, 1997 y 2005).



**FIGURA 5**  
**Distribución espaciotemporal del comportamiento tendencial de variables termopluviométricas en la ZMT (1960-2009) con un nivel de confianza del 95 %**

Fuente: elaboración propia



Por su parte, en los municipios centrales (Almoloya de Juárez, Metepec, Toluca y Zinacantepec) que concentran 70 % de la población de la ZMT, se devela una tendencia de *incremento de precipitación*. Nuestra hipótesis es que esta situación se relaciona con la formación de islas de calor y el aumento de partículas contaminantes en esta área, que es la más poblada y activa de la zona metropolitana. La concentración e incremento de precipitación anual acumulada derivan de anomalías térmicas inducidas por la isla de calor urbana con presencia de zonas convectivas que crean un campo de baja presión, lo que provoca flujos de la periferia al centro del espacio urbano, cuya tendencia se caracteriza por la forma de precipitación: menor frecuencia y mayor magnitud. Esto es consistente con lo que han encontrado autores como Morales *et al.*, 2007; Pérez *et al.*, 2010; Romero Dávila *et al.*, 2011.

## ¿QUÉ PODEMOS DEDUCIR DE LOS RESULTADOS PARA EL FUTURO DE LA ZMT?

Explicar las notables variaciones en la temperatura y precipitación en la ZMT rebasa los límites de este trabajo. Sin embargo, a partir de la teoría presentada en las primeras secciones de este texto, es posible identificar algunos fenómenos que integrarían explicaciones probables. Estarían sujetos a comprobación empírica, por lo que podrían integrar una agenda de investigación. La explicación podría ser como sigue.

Primero, hacia 1970 el sistema lacustre de la ZMT bajó a su nivel crítico en un proceso histórico de desecación de las ciénagas de Lerma, con lo que disminuyó el nivel freático del acuífero, de sus humedales y de su vegetación natural (Albores, 1995). De manera paralela, la dinámica demográfica registró un acelerado crecimiento (la población de la ZMT se incrementó 420 % de 1960 a 2010) lo que implicó una redistribución espacial de la población (densidad de población). Por su parte, la mancha urbana pasó de 14.3 km<sup>2</sup> en 1960 a 413.3 km<sup>2</sup> en 2010 (la superficie urbana se multiplicó cerca de 29 veces). Esta expansión por competencia del espacio urbano-industrial tuvo un efecto transformador en los usos del suelo (agrícola y pecuario) y vegetación (forestal). El periodo 1970-1980 marca un impulso de ascenso al contexto urbano, con el establecimiento de corredores de tipo industrial (Toluca-Lerma), de servicios y de comercio, articulando de esta manera a los municipios que conforman la ZMT (Orozco y Sánchez, 2004).

Segundo, se deduce que las tendencias del microclima urbano en la ZMT son justamente resultado histórico de la combinación espaciotemporal de estos procesos y factores moduladores del clima. La transformación del territorio (superficie natural a urbana) incrementó la temperatura y por consiguiente estas alteraciones han conducido a que la ciudad sea más seca. Bajo la presión indiscutible de modelos económicos y actividades que emiten a la atmósfera cantidades significativas de calor y contaminantes, la recurrencia de condiciones climáticas extremas de riesgo y vulnerabilidad se eleva, a lo que se aúna la disminución de servicios ambientales de regulación.

Tercero, para el desarrollo futuro de las ciudades es necesario enfatizar la trascendencia estratégica que implica el comportamiento y variación del régimen termoplumiométrico como *indicador-nodo* multiescalar (local-global) implicado tanto en el enorme desafío de mitigación y adaptación climática, como en el dinamismo y transformación de los contextos ambiental, económico y social. Sin embargo, ¿cómo podemos dimensionar estos cambios? Si la imagen objetivo de la ONU es de 2.0 °C y la imagen deseable es de 1.5 °C,<sup>12</sup> la ZMT que se analiza en este trabajo ha tenido en el periodo de cincuenta años que va de 1960-2009 un aumento de temperatura de 0.61°C, y un incremento pluviométrico de 92.10 mm por arriba del promedio anual, lo cual parece aceptable considerando que representan fluctuaciones atmosféricas de ajuste, variabilidad natural y deterioro ambiental estrechamente relacionadas con la presencia de las islas de calor y de precipitación.

¿Pero cuál sería el escenario futuro? Veamos. Si suponemos un incremento en las tasas anuales (0.01 °C de calentamiento y 2.0 mm de precipitación) debido al crecimiento acelerado de la ZMT, se prevé un escenario para las próximas décadas de mayor deterioro ambiental con implicaciones de amenaza a la *seguridad y justicia*

(hídrica y social), riesgo climático y vulnerabilidad para el bienestar de los habitantes de la ZMT, advirtiendo la incidencia de conflictos ambientales, económicos y sociales, que pudieran agravarse aún más si el umbral señalado se supera. Por tanto, el punto estratégico de sostenibilidad obedece a dar seguimiento a la asimetría y acercarse a un difícil equilibrio en una ciudad que no está preparada para mantener los incrementos bajo control, con manejo precautorio y reducción de impactos (tendencias espaciotemporales).

Finalmente, la tendencia, intensidad y el ritmo acelerado de variación en las condiciones meteorológicas en espacios urbanos implican respuestas anticipadas, proactivas y de largo aliento en materia de *prevención, mitigación y adaptación*. La participación de los habitantes de la ZMT es clave, especialmente ante fenómenos excepcionales de alto impacto (régimen estacional) no registrados o experimentados en el pasado.<sup>13</sup> Por tal motivo se destaca el papel futuro que representa la ZMT como agente modificador mesomicroclimático bajo los indicadores siguientes.

a) La presión por demanda de bienes y energía de los 2.2 millones de habitantes es creciente y representan el 14 % del total estatal; cifra similar al total de habitantes del estado de Tabasco (CONAPO, 2011). La cercanía de la ZMT a la Ciudad de México la hace un polo de atracción de población y actividades. Esta situación, mas la futura puesta en operación del Tren Interurbano México-Toluca (en 2018) sugiere que lo más probable es que la ZMT continúe creciendo en términos poblacionales y económicos.

b) La emisión de gases contaminantes, sólo de los cerca de 800 mil vehículos automotores de la ZMT (INEGI, 2016) es brutal. Esta cantidad de vehículos representa 13 % del total estatal y es superior al total de vehículos registrados en el estado de Yucatán, por ejemplo. La falta de un programa serio de transporte colectivo metropolitano hace que la ZMT tenga una de las proporciones más altas del país de vehículos automotores por cada 100 mil habitantes. La conclusión es sencilla: la emisión de gases contaminantes seguirá incrementándose en la ZMT.

c) La emisión de gases contaminantes derivados del desarrollo económico e industrial, conformado por 9 284 industrias manufactureras (17 % del total estatal, y cifra mayor que el total del estado de Baja California, por ejemplo), y 47 576 comercios (15 % del total estatal, y cifra mayor que el total del estado de Coahuila) (INEGI, 2017), terminan por explicar que la ZMT sea la segunda ciudad más contaminada de México (por debajo de Monterrey, pero por encima de la Ciudad de México).<sup>14</sup> Los valores PM2.5 de la ZMT son similares a los reportados por ciudades conocidas por sus altos niveles de contaminación como Sarajevo (Bosnia y Herzegovina), Shenzhen y Kunming (China), Patiala (India), Teherán (Irán) o Dakar (Senegal), entre otras (OMS, 2016).

d) El crecimiento poblacional y económico a densidades constantes de la ZMT implica acelerados cambios y deterioro ambiental, especialmente en la periferia: urbanización de zonas agrícolas, reducción de cubierta forestal y humedales, pero también en municipios como Metepec y Zinacantepec, en los que numerosos predios y ejidos dedicados a la agricultura están entrando al mercado inmobiliario. Esto producirá impactos con la exponenciación del riesgo y vulnerabilidad.

e) Dada la composición de materiales impermeables en la ZMT, aunado al incremento de precipitación —por presencia de eventos extraordinarios—, se anticipa que aumente la vulnerabilidad e impacto de riesgo climático, ya que la evolución de la ciudad favorecerá el escurrimiento superficial y la saturación de las redes de drenaje (que se encuentran en el límite de la obsolescencia). La situación negativa de recarga de agua por infiltración al acuífero de Toluca agravará aún más el problema de *seguridad hídrica* de la región (Vilchis-Mata *et al.*, 2018b).

f) La ZMT ya presenta un déficit de áreas verdes. Si esta variable no es considerada con seriedad en la planeación del crecimiento de la ZMT se comprometerán los aportes de servicios ambientales necesarios que ofrecen las áreas verdes a futuro como factor de regulación del clima urbano, los ecosistemas circundantes y su biodiversidad.

## CONCLUSIONES Y APORTACIONES

Los territorios complejos y diferenciados representados por las ciudades son una pieza clave y destacan como un componente más del sistema climático. Tienen la capacidad de alterarlo tanto a escala microrregional, como a escala global, e igualmente crean condiciones y sufren las consecuencias. Los incrementos-decrementos termoplumiométricos generados por las ciudades representan un importante factor de riesgo y colocan en situación de incertidumbre los límites de seguridad a escala global. Es justo en ese nicho donde con este trabajo perfilamos fortalecer la capacidad de anticipación y adaptación/mitigación ante escenarios futuros, destacando sobre otros trabajos similares el análisis y correlación de la influencia preponderante de la *multifuncionalidad de las ciudades* como fuentes y agentes antrópicos modificadores del sistema mesomicroclimático, ante el reto nada sencillo de mantener estable la tasa promedio de incremento anual e impactos de la temperatura y la precipitación, no limitados únicamente al contorno geográfico en la zona metropolitana de Toluca, ofreciendo una gran oportunidad de empoderamiento y fomento de capacidades de vinculación urbana en las tres dimensiones claves del desarrollo sostenible: la ambiental, la económica y la social.

Si bien es cierto que la consideración de variables termoplumiométricas por sí mismas no bastan para comprender y revertir tendencias de su incremento, es necesario relacionarlas con indicadores de integración de acciones-soluciones en materia de sostenibilidad, que permitan frenar el deterioro y un posible colapso del sistema urbano en su conjunto. Por tanto, es imprescindible actuar y no esperar a que por omisión los escenarios proyectados se presenten, pues constituyen un punto sin retorno. Las opciones existen y radican en la importancia de implementar soluciones exitosas a nivel regional bajo los *objetivos de desarrollo sostenible (ODS), la nueva agenda urbana y los acuerdos de la COP 23*.

Un componente clave para el empoderamiento sostenible es la planeación adaptativa a mediano y largo plazo, con la participación y conciliación de intereses implicados en las esferas gubernamental y social (individual y colectiva). Dicho empoderamiento representa un mecanismo a través del cual se pueden dirigir y alcanzar objetivos, en la toma de decisiones estratégicas de efectos y consecuencias futuras, bajo procesos congruentes multifacéticos y multidimensionales capaces de propiciar la creación y fortalecimiento de patrones de desarrollo sostenible (interacciones mutuas y dinámicas entre lo ambiental, económico y social), para adaptarse, revertir y hacer frente al deterioro ambiental y riesgo climático de manera transparente e inclusiva (Singh y Titi, 1995).

Se debe reconocer que la zona metropolitana de Toluca se encuentra en un contexto de *opciones reducidas* (ambiental-económico-social) e inmersa en problemas a escala de megaciudades o megalópolis. Dos temas resultan estratégicos: 1. Disminuir la *modificación mesomicroclimática*, y 2. Planear la *redefinición del clima regional*. Máxime, si consideramos en ambas tareas que el cambio ambiental global es un problema social, cuya presión, ritmos y mecanismos de *control-monitoreo* y *mitigación-adaptación*, requieren una aproximación multiescalar en tiempo y espacio.

## REFERENCIAS

- Albores, Beatriz (1995). *Tules y sirenas. El impacto ecológico y cultural de la industrialización en el Alto Lerma*. México: El Colegio Mexiquense/Gobierno del Estado de México.
- Alexandre, Malco Jeiel De Oliveira; García, Felipe Fernández, y Nunes, Elías (2013). “Las oscilaciones climáticas en la atmosfera urbana de la ciudad de natal, Brasil a través de las series largas de temperaturas del aire”. *HOLOS*, 29(5), pp. 137-156.
- Ángel, Laura; Ramírez, Alberto, y Domínguez, Efraín (2010). “Isla de calor y cambios espacio-temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá”. *Revista de la Academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales*, 34(131), pp. 173-183.

- Austria, Polipetro Martínez y Gómez, Carlos Patiño (2007). *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales/Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 76 pp.
- Bahl, H. D. y Padmanabhamurty, B. (1979). "Heat Island Studies at Delhi". *Mausam*, 30(1), pp. 119-122.
- Barry, Roger G., y Chorley, Richard J., (2010). *Atmosphere, Weather and Climate*. London: Routledge, 370 pp.
- Blake, Reginald; Grimm, Alice; Ichinose, Toshiaki; Horton, Radley; Gaffin, Stuart; Jiong, Shu; Bader, Daniel, y Cecil, L. DeWayne (2011). "Urban Climate: Processes, Trends, and Projections". En: Cynthia Rosenzweig, William D. Solecki, Stephen Hammer, y Shagun Mehrotra (eds.). *Climate Change and Cities: First Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 43-81.
- Bruckman, William, y Ramos, Elio (2009). "El Sol y el clima en la Tierra". *Revista Umbral*, 42(1), pp. 42-53. Recuperado de <https://ojs.uprrp.edu/index.php/umbral/article/download/16/5>
- Capelli de Steffens, Alicia M.; Piccolo, María Cintia, y Campo de Ferreras, Alicia M. (2006). "Clima urbano de Bahía Blanca". *Revista Universitaria de Geografía*, 15(1), pp. 183-186.
- Castro, Augusto (2011). "La multiplicación de las vulnerabilidades. Cambio climático y pobreza". En Augusto Castro (ed.), *Los nuevos retos de la política social en el Perú. Articulando la academia con la gestión pública*. Lima: MOST-UNESCO, pp. 15-49.
- Chandler, Tony J. (1962). "London's Urban Climate". *The Geographical Journal*, 128(3), pp. 279-298.
- CICS/UNESCO (2013). *Informe mundial sobre ciencias sociales 2013-Cambios ambientales globales*. París: UNESCO-OCDE, 690 pp.
- Conapo (Consejo Nacional de Población) (2011). "Proyecciones de la población de México 2005-2050". Mexico: Consejo Nacional de Poblacion, 30 pp.
- Contreras Cardosa, Alfredo; Salas Plata Mendoza, Jorge A.; Velásquez Angulo, Gilberto; Quevedo Urías, Héctor (2008). "Determinación de la isla de calor urbano en Ciudad Juárez mediante programa de cómputo". *CULCyT*, 5(26), pp. 3-16.
- CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) (2015). "Conferencia de las Partes 21º período de sesiones. Aprobación del acuerdo de París". Recuperado de <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/l09s.pdf>
- Crutzen, Paul y Stoermer, Eugene (2006). "The Anthropocene". En Eckart Ehlers y Thomas Krafft (eds). *Earth System Science in the Anthropocene*. Berlin: Springer, pp. 13-18.
- Diamond, Jared (2007). *Colapso*. Barcelona: Random House Mondadori.
- Díaz Jiménez, Julio y Aldaz Berruezo, Javier (2017). "Cambio climático y salud". *Revista de Salud Ambiental*, 17(1), pp. 1-2.
- Duckworth, Fowler S. y Sandberg, J.S. (1954). "The Effect of Cities upon Horizontal and Vertical Temperature Gradients". *Bulletin of American Meteorological Society*, 35, pp. 198-207.
- Emmanuel, Rohinton (2011). "Clima urbano e planejamento em megalópoles equatoriais: principais desafios para uma efetiva ação adaptativa urban climate design in the equatorial megapolii: key challenges to effective adaptive action". *Fórum Patrimônio: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável*, 4(1), pp. 1-8.
- Fernández García, Felipe; Galán, Encarna, y Cañada, Rosa (2012). "Caracterización del régimen bioclimático medio del área metropolitana de Madrid, mediante la aplicación de la temperatura fisiológica (PET)". *Territoris*, 8(1), pp. 83-101.
- Ferrelli, Federico; Luján Bustos, María, y Piccolo, María Cintia (2017). "La expansión urbana y sus impactos sobre el clima y la sociedad de la ciudad de Bahía Blanca, Argentina". *Estudios Geográficos*, 77(281), pp. 469-489.
- Foken, Thomas (2008). *Micrometeorology*. Berlin: Springer, 308 pp.
- García Codrón, Juan Carlos; Diego Liaño, Concepción; Fernández de Arróyabe Hernández, Pablo; Garmendia Pedraja, Carolina, y Rasilla Álvarez, Domingo (2004). *El Clima entre el Mar y la Montaña*. Santander: IV Congreso de la Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, 756 pp.

- García, Enriqueta y Conabio (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) (1998). "Climas (Clasificación de Koppen modificada por García). Escala 1:1,000,000". México. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=clima1mcw>
- Georgescu, Matei; Morefield, Philip E.; Bierwagen, Britta G., y Weaver, Christopher P. (2014). "Urban Adaptation Can Roll Back Warming of Emerging Megapolitan Regions". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(8), pp. 2909-2914.
- Gil Olcina, Antonio y Olcina Cantos, Jorge (2017). *Tratado de climatología*. Alicante: Universidad de Alicante, 952 pp.
- Goetz, Scott J.; Mack, Michelle C.; Gurney, Kevin R.; Randerson, James T., y Houghton, Richard A. (2007). "Ecosystem Responses to Recent Climate Change and Fire Disturbance at Northern High Latitudes: Observations and Model Results Contrasting Northern Eurasia and North America". *Environmental Research Letters*, 2(4), pp. 1-9.
- Grimmond, Sue (2007). "Urbanization and Global Environmental Change: Local Effects of Urban Warming". *Geographical Journal*, 173(1), pp. 83-88.
- IPCC/OMM/PNUMA (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Organización Meteorológica Mundial, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) (2013). "Bases físicas. Resumen para responsables de políticas, Resumen técnico y Preguntas frecuentes". Ginebra: IPCC/OMM/PNUMA. Recuperado de: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL\\_SPANISH.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf).
- Hebbert, Michael (2014). "Climatology for City Planning in Historical Perspective". *Urban Climate*, 10(2), pp. 204-215.
- Howard, Luke (1833). *The climate of London, vols. I-III*. London: Harvey and Dorton.
- Huong, Huynh Thi Lan, y Pathirana, Assela (2013). "Urbanization and climate Change Impacts on Future Urban Flooding in Can Tho City, Vietnam". *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), pp. 379-394.
- INEGI (2016). "Vehículos de motor registrados en circulación". Recuperado de [http://www.inegi.org.mx/est/lista\\_cubos/consulta.aspx?p=adm&c=8](http://www.inegi.org.mx/est/lista_cubos/consulta.aspx?p=adm&c=8)
- INEGI (2017). "Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE)". Recuperado de <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/directorio/>
- Isaza Delgado, José Fernando y Campos Romero, Diógenes (2007). *Cambio climático: glaciaciones y calentamiento global*. Bogotá: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 293 pp.
- Jaramillo, Pablo y Nazemi, Ali (2017). "Assessing Urban Water Security under changing climate: challenges and Ways Forward". *Sustainable Cities and Society*. En prensa.
- Jáuregui, Ernesto (1971). *Mesomicroclima de la Ciudad de México*. México: Instituto de Geografía-UNAM, 87 pp.
- Jáuregui, Ernesto (1990). Influence of a Large Urban Park on Temperature and Convective Precipitation in a Tropical City. *Energy and buildings*, 15 (3-4), pp. 457-463.
- Jáuregui, Ernesto; Romieu, Isabelle; Gutiérrez Ávila, Héctor J. (1991). "El clima urbano y su relación con los contaminantes del aire". En J. Héctor Gutiérrez Ávila, Germán Corey e Isabelle Romieu (eds.), *Curso básico sobre contaminación del aire y riesgos para la salud*. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud/Organización Panamericana de la Salud/Organización Mundial de la Salud, pp. 50-2.
- Jáuregui, Ernesto (1995). "Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización: Revisión y perspectivas". *Investigaciones geográficas*, (31), pp. 09-44.
- Jáuregui, Ernesto y Heres, María Eugenia (2008). "El clima/bioclima de un parque periurbano de la Ciudad de México". *Investigaciones geográficas*, (67), pp. 101-112.
- Kratzer, P. Albert; Vieweg, Friedrich, y Braunschweig, Sohn (1962). *The Climate of Cities*. Boston: American Meteorological Society, 221 pp.
- Landa, Rosalva; Meave, Jorge, y Carabias, Julia (1997). "Environmental Deterioration in Rural Mexico: An Examination of the Concept", *Ecological Applications*, 7(1), pp. 316-329.

- Landa, Rosalva; Magaña, Víctor, y Neri, Carolina (2008). *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 129 pp.
- Lombardo, Magda Adelaide (1997). *Estudios interdisciplinarios, metodologías e técnicas de análisis de clima urbano* [CD-ROM]. Buenos Aires: VI Encuentro de Geógrafos de América Latina.
- López Soria, José Ignacio (2015). "Río + 20 y el desarrollo". En Nicole Bernex y Augusto Castro, *Río + 20 Desafíos y Perspectivas*. Lima, Perú: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, pp. 95-108.
- Magaña, Víctor O. (1999). *Los impactos de El Niño en México*. México: Centro de Ciencias de la Atmósfera-UNAM/ Dirección General de Protección Civil/Secretaría de Gobernación, 229 pp.
- Martín-Vide, Javier (2017). "Cambio climático y modificación local del clima en Barcelona". En Domènec Corbella (dir.). *Aigua i l'espai públic, L. Anàlisi dels efectes del canvi climàtic*, Barcelona: Universitat de Barcelona, pp. 21-32.
- MEA (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Millennium Ecosystem Assessment*. Washington, DC: Island Press.
- Miguel Velasco, Andrés Enrique; López Villanueva, Marcelo Andrés; Moreno Avendaño, Julita, y Pérez Pérez, Maribel (2017). "Análisis del impacto de las pequeñas y medianas ciudades en el cambio climático. El caso de Oaxaca, México 2000-2015". *Sociedad y Ambiente*, (14), pp. 99-118.
- Mitchell, James (1994). "Disaster Prevention: Riddle, Mystery or Enigma?". Ponencia presentada en la Conferencia Internacional sobre Sociedad y Prevención de Desastres. México: UNAM.
- Molina, Mario; Sarukhán, José; Carabias, Julia (2017). *El cambio climático: causas, efectos y soluciones*. México: Fondo de Cultura Económica. 222 pp.
- Morales, Carlos; Madrigal, Delfino, y González, Lidia Alejandra (2007). "Isla de calor en Toluca, México". *Ciencia Ergo Sum*, 14(3), pp. 307-316.
- Moreno García, María del Carmen y Serra Pardo, Juan Antonio (2017). "The Urban Heat Island in the City of Lloret de Mar". *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (73), pp. 511-514.
- Mote, Thomas L.; Lacke, Matthew C., y Shepherd, J. Marshall (2007). "Radar Signatures of the Urban Effect on Precipitation Distribution: A Case Study for Atlanta, Georgia". *Geophysical Research Letters*, 34(20), pp. 1-4.
- Oke, Timothy (1979). *Technical note No. 169: Review of urban climatology*. Geneva: World Meteorological Organization, 114 pp.
- Oke, Timothy (1987). *Boundary Layer Climates*. London: Routledge, 464 pp.
- Olivier, John E. (2005). *Encyclopedia of World Climatology*. The Netherlands: Springer, 854 pp.
- Oltra, Christian; Solà, Rosario; Sala, Roser; Prades, Ana, y Gamero, Nuria (2009). "Cambio climático: percepciones y discursos públicos". *Prisma social*, (2), pp. 1-23.
- OMS (Organización Mundial de la Salud) (2016). "Global Urban Ambient Air Pollution Database". Geneva: Diunduh. Recuperado de [http://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair/databases/cities/en/#](http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/#)
- OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) (2012). "Perspectivas ambientales de la OCDE hacia 2050". Recuperado de <https://www.oecd.org/environment/outlookto2050>
- Orozco, Estela y Sánchez, María Teresa (2004). "Organización socioeconómica y territorial en la región del Alto Lerma, Estado de México". *Investigaciones geográficas*, (53), pp. 163-184.
- Pérez, José Isabel Juan; Némiga, Xanat Antonio; Monroy Gaytán, José Francisco; Gutiérrez Cedillo, Jesús Gastón; Balderas Plata, Miguel Ángel; Loik, Michael E.; Hernández González, Margarita Marina; Camacho Sanabria, José Manuel (2010). "Variaciones climáticas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca, Estado de México: 1960-2007". *Ciencia Ergo Sum*, vol. 17, núm, 2, pp. 143-153.
- Quereda Sala, José; Montón Chiva, Enrique, y Escrig Barberá, José (2007). "Un análisis experimental del efecto urbano sobre las temperaturas". *Investigaciones Geográficas*, (43), pp. 5-17.
- Raworth, Kate (2012). "A Safe and Just Space for Humanity: Can We Live within the Doughnut". *Oxfam Policy and Practice: Climate Change and Resilience*, 8(1), pp. 1-26.
- Renou, Emilien Jean (1856). *Instructions météorologiques, et Tables usuelles*. Oxford: Universidad de Oxford, Soc. météorol. de France, 112 pp.

- Román, Emilia; Gómez, Gloria, y de Luxán, Margarita (2017). “La isla de calor en Madrid y su influencia en el confort urbano”. En *Proceedings of the 3rd International Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions*. Universidad de Sevilla/Escuela Técnica Superior de Arquitectura, pp. 497-508.
- Romero Dávila, Sonia; Morales Méndez, Carlos Constantino; Némiga, Xanat Antonio (2011). “Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México”. *Revista de climatología*, vol. 11.
- Romero Lankao, Patricia (2007). “Are We Missing the Point? Particularities of Urbanization, Sustainability and Carbon Emissions in Latin American Cities”. *Environment and Urbanization*, 19(1), pp. 159-175.
- Schmidt, Wilhelm (1917). “Zum Einfluß großer Städte auf das Klima”. *Naturwissenschaften*, 5(30), pp. 494-495.
- Sham, Sani (1973). “The Urban Heat Island: Its Concept and Application to Kuala Lumpur”. *Sains Malaysiana*, 2(1), pp. 53-64.
- Shepherd, J. Marshall; Pierce, Harold, y Negri, Andrew J. (2002). “Rainfall Modification by Major Urban Areas: Observations from Spaceborne Rain Radar on the TRMM satellite”. *Journal of Applied Meteorology*, 41(7), pp. 689-701.
- Singh, Naresh, y Titi, Vangile (1995). *Empowerment for Sustainable Development: Toward Operational Strategies*. Fernwookd Publishing.
- Sjögersten, Sofie; Atkin, Chris; Clarke, Michèle L.; Mooney, Sacha J.; Wu, Bin, y West, Helen M. (2013). “Responses to Climate Change and Farming Policies by Rural Communities In Northern China: A Report on Field Observation and Farmers’ Perception in Dryland North Shaanxi and Ningxia”. *Land Use Policy*, 32, pp. 125-133.
- Sobrinho, Jaime; Garrocho, Carlos; Graizbord, Boris; Brambila, Carlos; Aguilar, Adrián Guillermo (2015). *Ciudades sostenibles en México: una propuesta conceptual y operativa*, México: United Nations Population Fund/CONAPO.
- Tol, Richard S. J. (2017). “Population and Trends in the Global Mean Temperature”. *Atmósfera*, 30(2), pp. 121-135.
- UNEP (2016). *Global Environment Outlook GEO-6. Regional Assessment for Latin America and the Caribbean*. United Nations Environment Program, Nairobi, Kenia, 260 pp.
- Velasco, Erik y Roth, Matthias (2010). “Cities as Net Sources of CO<sub>2</sub>: Review of Atmospheric CO<sub>2</sub> Exchange in Urban Environments Measured by Eddy Covariance Technique”. *Geography Compass*, 4(9), pp. 1238-1259.
- Vilchis-Mata, I., Garrocho-Rangel, C. F., Díaz-Delgado, C. (2018a) “Estrés hídrico y desarrollo urbano sostenible en la Zona Metropolitana de Toluca: desafíos y alternativas”. En *Zonas Metropolitanas: teoría y práctica*. *Centro-MET*, en prensa.
- Vilchis-Mata, I., Garrocho-Rangel, C. F., Díaz-Delgado, C. (2018b) “Modelo dinámico adaptativo para la toma de decisiones sostenibles en el ciclo hidrosocial urbano en México”. *Revista de Geografía Norte Grande*, (71), en prensa.
- WMO/GWP Associate Program on Flood Management (2008). “Urban Flood Risk Management - A Tool for Integrated Flood Management”. *APFM Technical Document No. 11, Flood Management Tools Series*.
- Wong, Nyuk Hien, y Yu, Chen (2005). “Study of Green Areas and Urban Heat Island in a Tropical City”. *Habitat international*, 29(3), pp. 547-558.
- Zhong, Shi; Qian, Yun; Zhao, Chun; Leung, Ruby; Wang, Hailong; Yang, Ben; Fan, Jiwen; Yan, Huiping; Yang, Xiu-Qun, y Liu, Dongqing (2017). “Urbanization-Induced Urban Heat Island and Aerosol Effects on Climate Extremes in the Yangtze River Delta Region of China”. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(8), pp. 5439-5457.

## NOTAS

- 1 Relacionado con la falta de correspondencia y distinción multiescalar entre evaluaciones globales y acciones de intervención local, debido a la organización, retroalimentación, dinámica e influencia de procesos y costo-beneficio entre los sistemas naturales y urbanos (MEA, 2005).
- 2 Las ciudades representan laboratorios vivientes que ofrecen oportunidades para mejorar su capacidad de desarrollo sostenible, ante la persistencia de desafíos ambientales y urbanos (UNEP, 2016).

- 3 El deterioro ambiental es el resultado de la dinámica e interacción entre elementos naturales (erosión) y humanos (alteración e influencia antrópica) ligados con la modificación del ambiente en el sentido de pérdida de sus cualidades, y expresa un decremento de bienes y servicios ambientales (Landa *et al.*, 1997).
- 4 A partir de los años cincuenta del siglo XX, el sistema socioeconómico ha agudizado su impacto a escala global. A este fenómeno se le ha llamado *calentamiento global* e incluye el *cambio climático antrópico* (Martín-Vide, 2017).
- 5 El deshielo de casquetes polares y glaciares, el aumento del nivel del mar y el desarrollo de huracanes intensos, representan las principales evidencias y consecuencias, prácticamente irreversibles, del acelerado incremento de temperatura en la atmósfera baja (tropósfera), atribuible con cierta incertidumbre a la actividad humana. Esto exige la adopción de estrategias de adaptación y mitigación ante efectos negativos de riesgo para el medio ambiente, la economía y la sociedad (Isaza y Campos, 2007; Landa *et al.*, 2008; IPCC/OMM/PNUMA, 2013; Molina *et al.*, 2017).
- 6 Los GEI corresponden a gases de absorción de radiación infrarroja de larga persistencia: el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), ozono (O<sub>3</sub>) y clorofluorocarbonos (CFC), cuya concentración y permanencia en la atmósfera obstruye la salida de radiación, destruye la capa de ozono y refuerza el efecto invernadero, generando periodos de enfriamiento y calentamiento alternados. Por efecto invernadero entendemos un proceso en el que la radiación térmica emitida por la superficie de la tierra es absorbida por los GEI y se proyecta en todas direcciones. Parte de esta radiación regresa a la superficie terrestre y a la atmósfera baja, lo que provoca un incremento de la temperatura superficial media terrestre (CMNUCC, 2015).
- 7 El incremento notable de la velocidad e intensidad del impacto humano en el clima se origina a finales del siglo XVIII, con el inicio de la revolución industrial (Crutzen y Stoermer, 2006).
- 8 La problemática ambiental global se refiere a cambios ambientales múltiples y transformaciones biofísicas interactivas entre los procesos humanos y naturales. Comprende el cambio climático y las tendencias cambiantes de la biodiversidad, el uso de la tierra y la urbanización, así como cambios en los océanos. Estos cambios están estrechamente vinculados con los procesos de globalización socioeconómica y cultural (OCDE, 2012). Los *nodos* de estos procesos de globalización son las ciudades (Sobrino *et al.*, 2015).
- 9 El estudio de las modificaciones del clima producido por la sustitución de superficies naturales por elementos del tejido urbano y el contraste térmico campo-ciudad, tiene sus orígenes en trabajos de climatología urbana desarrollados para distintas latitudes, generando toda una corriente de investigación sobre la evolución de la temperatura al interior de las ciudades, por mencionar algunos: Howard (1833); Renou (1856); Schmidt (1917); Duckworth y Sandberg (1954); Kratzer *et al.* (1962); Chandler (1962); Jáuregui (1971); Sham (1973); Bahl y Padmanabhamurty (1979); Oke (1979; 1987), Olivier (2005); Quereda Sala *et al.* (2007); Barry y Chorley (2010).
- 10 La delimitación de la ZMT se ajustó en 2018 (CONAPO, 2018): <https://www.gob.mx/conapo/documentos/delimitacion-de-las-zonas-metropolitanas-de-mexico-2015?idiom=es>
- 11 Recordar que la tendencia espaciotemporal es un indicador de tendencia constante. Puede ser *creciente* (temperatura máxima, temperatura promedio y precipitación), o *decreciente* (temperatura mínima) durante todo el periodo de análisis (1960-2009). Es decir, que los valores continuamente aumentan y no disminuyen, o en su defecto disminuyen y no incrementan. En otras palabras, no se consideran *discontinuidades climáticas*.
- 12 La *Conferencia de la ONU sobre cambio climático* desarrollada en París en 2015, estableció como objetivo lograr que el aumento de la temperatura global en este siglo se mantenga por debajo de los 2.0 °C, así como impulsar esfuerzos hacia el límite de 1.5 °C, como línea de defensa más segura y significativa ante los impactos más graves del cambio climático.
- 13 Nos referimos, por ejemplo, al *índice bioclimático*, es decir a las interacciones entre los procesos atmosféricos y los seres vivos que determinan las sensaciones térmicas y respuestas de las personas ante condiciones climáticas específicas (Fernández, Galán y Cañada, 2012).
- 14 La ZMT registra niveles medios anuales de concentración de material particulado de 80 µg/m<sup>3</sup> de menos de 10 micras de diámetro (PM10), y 33 µg/m<sup>3</sup> de menos de 2.5 micras de diámetro (PM2.5), que exceden los límites y directrices de calidad del aire: 20 µg/m<sup>3</sup> de PM10, y 10 µg/m<sup>3</sup> de PM2.5. La exposición a este material particulado constituye un importante riesgo para la salud que afectan los niveles de alta mortalidad en el largo plazo (OMS, 2016).

## INFORMACIÓN ADICIONAL

*Griselda Escalona Segura*: Editora asociada