Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60852 • ARTÍCULOS
Núm. 114 • Agosto • 2024 • e60852
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Expansión urbana y clima en las ciudades mexicanas. Un análisis del crecimiento, usos de suelo y clima urbano en México

Urban expansion and climate in mexican cities. An analysis of growth, land use and urban climate in Mexico

Roberto Ramírez Hernández*

Recibido: 23/01/2024. Aceptado: 16/04/2024. Publicado: 17/06/2024.

Resumen. Esta investigación examina la relación entre la expansión urbana y el incremento en las temperaturas en México. Para ello se utilizará un modelo econométrico de panel que permitirá analizar los patrones de temperatura en diferentes periodos (1975, 1990, 2000 y 2015) para una muestra de 132 ciudades mexicanas. Las urbes representan una variedad de tamaños, desde las más grandes hasta medianas y pequeñas.

El modelo busca medir el patrón creciente de tamaño urbano y su relación con el cambio en la temperatura ambiente. Para ello se considerará el tamaño de la industria de cada ciudad como un factor específico del uso del suelo. Este enfoque permitirá entender cómo los cambios en el uso del suelo y el desarrollo industrial están relacionados con el incremento en la temperatura ambiental.

El objetivo central de este trabajo es demostrar que los procesos de expansión urbana tienen una relación directa con el incremento en las temperaturas registradas para diferentes ciudades en nuestro país. En otras palabras, se busca dar evidencia empírica de que a medida que una ciudad crece y se expande, su temperatura media también tiende a aumentar.

A pesar de las limitaciones en información, este estudio representa un paso importante para entender mejor los impactos del cambio climático y la urbanización en las ciudades mexicanas.

La evidencia empírica acumulada en el debate actual respalda la idea de que las temperaturas en las áreas urbanas están en aumento. Esta tendencia se ve confirmada por los resultados presentados: las ciudades están experimentando un incremento en su temperatura promedio. Aunque este fenómeno ha sido documentado en numerosas ciudades alrededor del mundo, en México aún falta información al respecto. Los estudios más relevantes en este campo han sido realizados por Jáuregui (2004), quien ha registrado estos cambios en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México a lo largo de su expansión histórica. Sin embargo, en otras grandes ciudades mexicanas, como las Zonas Metropolitanas de Guadalajara, Monterrey, Puebla y Tijuana, aún no se cuenta con suficiente evidencia empírica que permita prever las posibles implicaciones futuras, ni siquiera es posible determinar los impactos actuales del crecimiento de las ciudades en el clima. Por lo tanto, es necesario fomentar el estudio de este fenómeno, especialmente en aquellas las ciudades más grandes de México que son altamente susceptibles a sufrir impactos significativos. Las variables obtenidas de la base de datos del proyecto europeo GHS Urban Centre Database 2015 muestran una fuerte correlación entre la temperatura urbana y factores como la expansión urbana a lo largo del tiempo, el crecimiento poblacional y sus actividades reflejadas en un aumento del transporte privado (automóviles) y otros factores como la actividad industrial de las grandes ciudades. El modelo permite verificar que las ciudades con más de un millón de habitantes son altamente susceptibles al continuo crecimiento poblacional (de ahí su significancia estadística). El crecimiento poblacional o de la actividad económica, como la industria, también implican aumentos en el uso del transporte y en la creación de infraestructura urbana, lo que reduce la vegetación y las superficies verdes que pueden refrescar el ambiente de las ciudades. Por estas

* Investigador Titular de Tiempo Completo. Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM. Circuito Mario de la Cueva, C.U., 04510, Ciudad de México, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5755-6091. Email: robrami@unam.mx

y otras razones, las ciudades no deberían expandirse más allá de ciertos límites.

Finalmente, se plantea la urgente necesidad de estudiar, mediante metodologías apegadas a lo científico, qué posibles escenarios habrá para las ciudades, no solamente las mexicanas sino todas las que son susceptibles del aumento de temperatura debido a su crecimiento desmesurado. Un enfoque prospectivo es siempre una herramienta fundamental para adelantarse a los posibles efectos y prever soluciones creativas y eficaces. La voluntad de los gobiernos en materia de planeación urbana es clave en este proceso y de allí el objetivo de mostrar los resultados.

Palabras clave: cambio climático, clima urbano, ciudades mexicanas, urbanización, uso de suelo, temperatura.

Abstract: This research proposes to examine the relationship between urban sprawl and the increase in temperatures in Mexico. For this purpose, an econometric panel model will be used to analyze temperature patterns in different periods (1975, 1990, 2000 and 2015) for a sample of 132 Mexican cities. The cities represent a variety of sizes, from the largest to medium and small cities.

The model seeks to measure the increasing pattern of urban size and its relationship with the change in ambient temperature. To do so, the size of industry in each city will be considered as a specific land use factor. This approach will allow us to understand how changes in land use and industrial development are related to the increase in ambient temperature.

The main objective of this work is to demonstrate that urban expansion processes have a direct relationship with the increase in temperatures recorded for different cities in Mexico. In other words, we seek to provide empirical evidence that as a city grows and expands, its average temperature also tends to increase.

Despite data limitations, this study represents an important step towards a better understanding of the impacts of climate change and urbanization in Mexican cities.

The empirical evidence accumulated in the current debate supports the idea that temperatures in urban areas are increasing. This trend is confirmed by the results presented: cities are experiencing an increase in their average temperature. Although this phenomenon has been documented in numerous cities around the world, there is still a lack of information in Mexico. The most relevant studies in this field have been carried out by Jáuregui (2004), who has recorded these changes in the Metropolitan Zone of Mexico City throughout its historical expansion. However, in other large Mexican cities, such as the Metropolitan Zones of Guadalajara, Monterrey, Puebla and Tijuana, there is still not enough empirical evidence to foresee possible future implications, nor is it even possible to determine the current impacts of city growth on climate. Therefore, it is necessary to promote the study of this phenomenon, especially in Mexico's largest cities, which are highly susceptible to significant impacts. The variables obtained from the European project GHS Urban Centre Database 2015 show a strong correlation between urban temperature and factors such as urban expansion over time, population growth and its activities reflected in an increase in private transport (cars) and other factors such as industrial activity in large cities. The model allows us to verify that cities with more than one million inhabitants are highly susceptible to continuous population growth (hence its statistical significance). Population growth or growth in economic activity, such as industry, also implies increases in the use of transportation and in the creation of urban infrastructure, which reduces vegetation and green surfaces that can refresh the environment of cities. For these and other reasons, cities should not expand beyond certain limits.

Finally, there is an urgent need to study, through scientifically based methodologies, the possible scenarios for cities, not only Mexican cities, but all those that are susceptible to temperature increase due to their excessive growth. A prospective approach is always a fundamental tool to anticipate possible effects and foresee creative and effective solutions. The willingness of governments in urban planning is key in this process and hence the objective of showing the results.

Keywords: climate change, urban climate, Mexican cities, urbanization, land use, temperature.

INTRODUCCIÓN

La preocupación por el cambio climático ha dado lugar a análisis sobre sus impactos en diversos ámbitos. Específicamente, las ciudades son espacios en donde el clima y sus factores de cambio han motivado muchos de los trabajos de investigación. En México destacan los esfuerzos del Dr. Ernesto Jáuregui Ostos, investigador del Instituto de Geografía de la UNAM, quien ha trabajado por décadas el tema del clima en las ciudades y cómo su infraestructura ha contribuido en algunos de los elementos centrales del clima tales como la temperatura ambiental y los niveles de precipitación pluvial. Su trabajo ha sido una guía indispensable para estos análisis y, especialmente, ha registrado evidencia empírica valiosa para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. El trabajo de Jáuregui parece haber demostrado que el crecimiento urbano, por lo menos en la capital mexicana, ha provocado un efecto de isla de calor asociado al aumento de las temperaturas, así como una posible disminución de la precipitación. Además, señala cómo los cambios en el uso del suelo han alterado el equilibrio ener-

gético y de allí al calentamiento atmosférico tanto en la ciudad como en áreas rurales circundantes.

En este trabajo se destaca la necesidad de considerar estos cambios en el uso del suelo al analizar los patrones climáticos regionales y locales. Sin embargo, se subraya la limitación de los datos disponibles, lo que hace necesario realizar más investigaciones para comprender con mayor profundidad el impacto de la urbanización y la deforestación en el clima de la región de la Ciudad de México y de otras ciudades.

Los autores interesados en el tema han planteado diversas preocupaciones sobre el clima y su impacto en las ciudades o bien, como estas son factor de cambio en el clima. Por ejemplo, Rodríguez, Vírguez y Behrentz (2016) han explorado la calidad del aire en ciudades latinoamericanas donde se analiza el impacto de la urbanización en la contaminación atmosférica y la salud pública. Sus investigaciones destacan cómo el desarrollo urbano influye en la calidad del aire en entornos urbanos. En México, Magaña y Gay García (2002) han estudiado los efectos sociales y económicos ante el cambio climático. Sus trabajos resaltan cómo la urbanización altera el clima local y regional, enfocándose en los efectos de la ciudad en el entorno climático circundante.

A nivel internacional destacan trabajos como el de Kalnay y Cai (2003), que han investigado los impactos de la urbanización y el cambio en el uso del suelo en el clima. Su investigación ha abordado cómo los cambios en el entorno urbano influyen en los patrones climáticos a nivel local y global. Brimblecombe (2014) dedicó su investigación al análisis de la contaminación del aire en entornos urbanos y su impacto en la salud humana y el medio ambiente. Sus estudios detallan la historia y la evolución de la polución atmosférica en ciudades, y también destacan la importancia de reducir las emisiones contaminantes para mejorar la calidad del aire y la salud pública. Katul *et al.* (2012) han estudiado la dispersión de semillas por el viento y los efectos de la urbanización en los ciclos hidrológicos y microclimas urbanos. Sus investigaciones resaltan cómo los cambios en el paisaje urbano pueden modificar los procesos ecológicos locales y regionales e influyen en la biodiversidad y los recursos hídricos. Los autores destacan la necesidad de considerar la planificación urbana en función de estos impactos para promover entornos urbanos más resilientes y sostenibles.

Por su parte, Stone Jr. *et al*. (2014) han investigado las tendencias de temperatura en zonas urbanas y rurales cercanas a grandes ciudades, resaltando el calentamiento diferencial entre estos entornos. Stone Jr. analiza el impacto del desarrollo urbano en los patrones térmicos locales y sus implicaciones en la vulnerabilidad de las áreas urbanas al cambio climático. Sailor *et al.* (2015) han revisado métodos para estimar las emisiones antropogénicas de calor y humedad en entornos urbanos. Sus estudios se centran en comprender cómo las ciudades generan y retienen calor, lo que contribuye al fenómeno del efecto de isla de calor urbano, y proporciona soluciones para atenuar este fenómeno. Georgescu *et al.* (2014) han analizado la adaptación urbana para contrarrestar el calentamiento en regiones metropolitanas emergentes. Sus trabajos exploran cómo las ciudades pueden reducir su vulnerabilidad al cambio climático a través de estrategias de planificación urbana que mitiguen el efecto isla de calor y limiten el aumento de temperaturas. Zhang *et al.* (2010) ha estudiado el efecto isla de calor urbano en ciudades durante los veranos y así determinar cómo este fenómeno contribuye al calentamiento local. Sus estudios revelan la importancia de comprender los patrones de temperatura en áreas urbanas para implementar medidas de adaptación al cambio climático. Gosselin (2001) ha adoptado un enfoque sinóptico para evaluar el impacto de la urbanización en la precipitación estival. Sus investigaciones resaltan cómo la urbanización puede influir en los patrones de lluvia al señalar la necesidad de considerar la expansión urbana al estudiar cambios en el clima y en los regímenes de precipitación.

Entre los trabajos más destacados, Jáuregui (2004) plantea que los cambios en el uso de suelo urbano han alterado de manera importante los patrones de temperatura locales. Documenta el caso de la Ciudad de México y la Cuenca del Valle de México, y muestra el incremento promedio de 0.07 °C por año.

Es precisamente este planteamiento de Jáuregui el que motiva este trabajo, esto es, que los procesos

de urbanización que implica el crecimiento poblacional de las ciudades, así como su expansión física que, a su vez, da lugar a mayores niveles de infraestructura urbana (de la que implica construcción con concreto, cemento y otros materiales) y, al mismo tiempo, de cada vez menos superficies verdes, da como resultado que el clima urbano, específicamente los niveles de temperatura presente patrones de crecimiento gradual o, tal como lo dice Kalnay y Cai (2003) en la revista *Nature:* "Las influencias antropogénicas más importantes sobre el clima son las emisiones de gases de efecto invernadero y cambios en el uso de la tierra, como urbanización y agricultura".

Se ha realizado una exhaustiva revisión de los impactos que tienen los procesos de urbanización como lo es la expansión en el clima local, específicamente en el clima de las ciudades, sin embargo, en el caso mexicano no ha resultado suficiente, toda vez que la ciudad mexicana más estudiada es la Ciudad de México y su zona metropolitana, mientras que resulta escasa la evidencia empírica documentada en otras ciudades mexicanas sobre los impactos de la expansión urbana sobre el clima. Es así como la preocupación por otras grandes ciudades mexicanas se ha extendido más allá de la Ciudad de México.

En este sentido, cabe hacerse la siguiente pregunta de investigación: ¿es la expansión urbana un factor que explica el incremento en la temperatura media de las ciudades mexicanas? De allí que el objetivo central de este trabajo es mostrar, mediante un modelo estadístico causal, que los procesos de expansión urbana tienen una relación directa con el incremento en las temperaturas registradas para diferentes ciudades en México.

Para responder esta pregunta se propone el uso de un modelo econométrico de panel, mismo que mostrará en diferentes periodos (1975, 1990, 2000 y 2015) los patrones de temperatura para una muestra de 132 ciudades en México, en las cuales están presentes las ciudades más importantes en términos de magnitud además de otras medianas y pequeñas. Con ello se busca medir el patrón creciente de tamaño urbano y su relación con el cambio en la temperatura ambiente. Se pretende también usar la industria de cada ciudad como factor de usos de suelo específico responsables de estos cambios.

MÉTODOS

Como en casi todos los países, la mayoría de la población en México se ha transformado paulatinamente en urbana. En 2020, este porcentaje[1] fue de 63.5%. Esto significa que seis de cada diez personas residen en una ciudad, con lo que la habitabilidad de las ciudades se ha vuelto una prioridad.

Para el caso de México, el aumento de la población en ciudades es notorio: desde 1990 a 2020 se ha pasado de 57.2% a 63.5% (Tabla 1).

La población urbana en México se encuentra agrupada en 401 ciudades en el Sistema Urbano Nacional (SUN), donde las más importantes son la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), seguida de la ZM de Guadalajara y la ZM de Monterrey, entre otras. Cabe decir que el tamaño de la ZMCM es significativamente mayor a la ciudad que ocupa el segundo lugar (ZM Guadalajara) esto es, cerca de 21 millones contra poco menos de cinco millones de habitantes, con lo que la relación de tamaño entre la ciudad número uno y la dos es de cerca de cinco veces.[2] Asimismo, la urbe número tres del país (ZM Monterrey) es prácticamente igual que la ZM de Guadalajara, con poco más de cuatro millones y medio.

Esto significa que las ciudades en México tienden a un crecimiento poblacional desmedido y, por ello, preocupante. Las tres más grandes poseen alrededor de la cuarta parte de la población total del país, razón para centrar el interés de este trabajo en el estudio de los cambios en el clima con respecto a estas urbes.

Para alcanzar el objetivo del presente estudio, se seleccionó una muestra de 132 ciudades mexicanas. La información fue tomada de la base de datos construida por el proyecto europeo GHS Urban Centre Database 2015, multitemporal and

[1] Utilizando el criterio de Luis Unikel (1976) en el que se asume como espacio urbano a toda aquella localidad con un mínimo de 15 000 habitantes.

[2] De hecho, el Índice de Primacía para tres ciudades, correspondiente a la ZMCM en 2020 es de 2.01. Lo que significa que las dos ciudades más grandes, después de la ZMCM, esto es, las ZM de Guadalajara y Monterrey, cabrían juntas dos veces en la ZM de la Ciudad de México (Ramírez, en prensa).

Tabla 1. México: distribución de la población por tamaño de localidades, 1990-2020.

Grupos de localidades según el tamaño de la población	1990			2000			
	Localidades	Población (miles de habitantes)	% de población total	Localidades	Población (miles de habitantes)	% de Población total	Localidades
Total del país	160 102	81 664	100.0	203 139	98 009	100.0	195 933
Urbana	416	46 675	57.2	513	59 419	60.6	630
1 000 000 y más	7	8958	11.0	10	13 241	13.5	11
500 000 – 999 999	14	8878	10.9	20	12 462	12.7	25
100 000 – 499 999	77	18 233	22.3	84	20 430	20.8	95
50 000 – 99 999	55	3855	4.7	64	4549	4.6	86
20 000 – 49 999	167	5075	6.2	226	6848	7.0	274
15 000 – 19 999	96	1,676	2.1	109	1888	1.9	139
No urbana	159 686	34 389	42.1	203 139	38 590	39.4	195 303
Mixta*	807	6643	8.1	948	7878	8.0	1182
10 000 – 14 999	197	2410	3.0	237	2906	3.0	300
5000 - 9999	610	4232	5.2	711	4972	5.1	882
Rural**	158 879	28 346	34.7	202 191	30 712	31.3	194 121
2500 - 4999	1365	4652	5.7	1590	5489	5.6	1845
1000 - 2499	4998	7486	9.2	5365	8097	8.3	5979
Menos de 1000	152 516	16 208	19.8	195 236	17 126	17.5	186 297

multidimensional attributes, R2019A (Florczyk *et al*., 2019), el cual consta de un conjunto original de 13 135 ciudades de todo el mundo.

Las ciudades mexicanas tomadas de este proyecto constituyen las 128 más grandes de México.[3] Esto incluye desde la ZM de la Ciudad de México hasta ciudades de aproximadamente 35 000 habitantes. Además de lo anterior, se agrega información de alrededor de diez ciudades adicionales de tamaño pequeño pero variable. Al consolidar toda la información contenida en esta base de datos para cada uno de los periodos de información disponibles (1975, 1990, 2000 y 2015) algunas ciudades fueron retiradas, lo que da como resultado un número definitivo de ciudades en todos los periodos de 132. En el Anexo 1 se muestra un listado con las ciudades incluidas en el estudio.

La información climática de las ciudades mexicanas debe asociarse con atributos como la región geográfica o el tamaño de la ciudad (en primera instancia). Cada una de las características climáticas de las ciudades apuntan a ciertas tendencias en función del tamaño y de la localización. Entonces, mientras que las ciudades ubicadas al centro o al norte del país parecen mantener temperaturas promedio relativamente bajas, en la parte sur del país la tendencia es a mostrar ciudades más cálidas en términos generales. Esto, desde luego, es atribuible a las condiciones climáticas de esas regiones, esto es, temperaturas más elevadas en el sur, sureste y península de Yucatán, mientras que en el resto de México las temperaturas son más templadas o inclusive más frías.

México cuenta con una megalópolis, la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), con aproximadamente 21 millones de habitantes, que ha registrado temperaturas relativamente más bajas que la mayoría de las ciudades del centro del país o de otras regiones. No obstante, de acuerdo con los datos registrados por el proyecto europeo GHS Urban Centre Database 2015, las temperaturas en la capital mexicana, durante el periodo de 1990 a 2015, han mostrado un incremento en temperatura promedio de 0.39 °C, esto es, casi medio grado centígrado en un periodo de 25 años, que de acuerdo con la literatura, resulta un aumento importante.

Con relación a la temperatura en las ciudades mexicanas de otras regiones es importante observar los datos que aporta la Tabla 2.

La Tabla 2 presenta un análisis de la temperatura media en grados centígrados de diversas ciudades mexicanas desde 1975 hasta 2015, agrupadas por regiones y estratos de tamaño de ciudad.

En la región del Centro, la temperatura media varía de 14.0 °C en la megalópolis de la ZMCM a 17.3 °C en las ciudades pequeñas, con un promedio total de 17.5 °C. En el Centro Norte, las ciudades grandes tienen una temperatura media de

Tabla 2. Temperatura media en °C por estrato de tamaño urbano y región. Ciudades mexicanas 1975-2015

Region	Megalópolis	Ciudades Grandes	Ciudades Medias	Ciudades Pequeñas	Total
Centro	14.0	15.0	18.8	17.3	17.5
Centro Norte	-	18.1	18.5	18.7	18.6
Centro Occidente	-	20.9	22.2	21.1	21.5
Centro Oriente	-	-	22.6	24.9	23.3
Norte	-	19.2	17.9	18.4	18.3
Noreste	-	22.5	22.4	23.0	22.5
Noroeste	-	-	23.1	22.1	22.6
Península de BC	-	-	20.2	-	20.2
Litoral-Pacífico	-	-	24.6	24.6	24.6
Península de Yucatán	-	-	26.5	26.3	26.4
Sureste	-	-	27.0	26.0	26.5
Suroeste	-	-	23.3	22.8	23.1
Total	14.0	18.7	22.0	21.2	21.4

Fuente: elaboración propia a partir de datos de Base de datos de centros urbanos de GHS 2015, atributos multitemporales y multidimensionales, R2019A. Comisión Europea, Centro Común de Investigación (JRC).

[3] Con excepción de seis ciudades grandes que fueron excluidas por razones exclusivamente atribuibles al mismo proyecto europeo.

18.1 °C, mientras que las ciudades pequeñas registran 18.7 °C, con un promedio total de 18.6 °C.

En la región del Centro Occidente, las ciudades medianas y pequeñas tienen temperaturas medias de 22.2 °C y 21.1 °C, respectivamente, con un promedio total de 21.5 °C. En el Centro Oriente, la temperatura media en las ciudades pequeñas es de 24.9 °C, con un promedio total de 23.3 °C.

En la región Norte las ciudades grandes tienen una temperatura media de 19.2 °C, mientras que las ciudades pequeñas registran 18.4 °C, con un promedio total de 18.3 °C. En el Noreste, las ciudades pequeñas tienen una temperatura media de 23.0 °C, con un promedio total de 22.5 °C. En el Noroeste, las ciudades medianas y pequeñas tienen temperaturas medias de 23.1 °C y 22.1 °C, respectivamente, con un promedio total de 22.6 °C.

En la Península de Baja California (BC), las ciudades medianas tienen una temperatura media de 20.2 °C. En el Litoral-Pacífico, las ciudades medianas y pequeñas tienen temperaturas medias de 24.6 °C y 24.6 °C, respectivamente, con un promedio total de 24.6 °C. En la Península de Yucatán, las ciudades medianas y pequeñas tienen temperaturas medias de 26.5 °C y 26.3 °C, respectivamente, con un promedio total de 26.4 °C.

En la región Sureste, las ciudades medianas y pequeñas tienen temperaturas medias de 27.0 °C y 26.0 °C, respectivamente, con un promedio total de 26.5 °C. En el Suroeste, las ciudades medianas y pequeñas tienen temperaturas medias de 23.3 °C y 22.8 °C, respectivamente, con un promedio total de 23.1 °C.

Al observar las temperaturas de las regiones, hay varias a destacar:

- Sureste: la región tiene la temperatura media más alta entre las ciudades medianas con 27.0 °C, lo que indica un clima bastante cálido. Los atributos geográficos de la región claramente son importantes.
- Centro: esta región tiene la temperatura media más baja en la megalópolis existente (ZMCM) con 14.0 °C, pero también con temperaturas relativamente más bajas en la misma región, lo que revela un clima más fresco en las ciudades de mayor tamaño asociadas a la región Centro.
- Península de BC: esta región solo cuenta con ciudades medias, con una temperatura promedio de 20.2 °C.
- Noroeste: esta región tiene la temperatura media más alta en las ciudades pequeñas con 22.1 °C, lo que indica un clima más cálido en las ciudades de menor tamaño.

Estas son solo algunas de las regiones que destacan en la tabla proporcionada, sin embargo, es claro que cada región tiene características climáticas únicas.

No obstante, la temperatura en las ciudades está asociada también a factores pertenecientes a la actividad urbana, tales como la industria y los servicios, mismas que están relacionadas con los usos de suelo y la utilización de sustancias. Algunos de los factores estarían asociados a lo siguiente:

A. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI): las actividades industriales, la quema de combustibles fósiles para la generación de energía, el transporte y otros procesos liberan dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (NO_x) y otros gases. Estos gases atrapan el calor en la atmósfera y con ello se contribuye al calentamiento global y al cambio climático.
B. Contaminación del aire: las emisiones industriales y vehiculares liberan contaminantes que pueden influir en la calidad del aire, la temperatura y la composición química de la atmósfera. Esto puede causar fenómenos como la inversión térmica, donde la capa de contaminación actúa como un "techo" al captar el calor cerca de la superficie, mismo que da lugar al empeoramiento de la calidad del aire.
C. Reducción del verdor por la urbanización: la urbanización puede alterar el clima local al cambiar la reflectividad de la superficie terrestre (albedo) y la cantidad de áreas verdes. Las ciudades con edificios altos, pavimentos oscuros y poca vegetación tienden a retener más calor (efecto isla de calor urbano) y a el consecuente incremento de las temperaturas locales.
D. Cambio en los patrones de uso del suelo: la deforestación, la expansión urbana y la agricultura intensiva pueden modificar los

patrones de precipitación, el ciclo del agua y la temperatura al afectar la absorción de la radiación solar y la evaporación.

E. Emisión de aerosoles y otros contaminantes: algunas actividades industriales emiten aerosoles y partículas que pueden afectar la formación de nubes y la radiación solar, lo que da lugar a la alteración de los patrones climáticos locales.
F. Alteración de los recursos hídricos: la extracción excesiva de agua, la canalización de ríos, la construcción de represas y el drenaje de humedales pueden afectar los patrones de precipitación y el ciclo del agua, con impactos en el clima local y regional.

En resumen, las actividades humanas, especialmente las relacionadas con la industria, el transporte, la urbanización y la agricultura intensiva, pueden tener un impacto significativo en el clima local y regional de una ciudad, y por lo tanto contribuir al calentamiento global y otros cambios climáticos. Estos efectos pueden variar según la ubicación geográfica, las condiciones climáticas regionales y la escala de las actividades humanas involucradas. La mayoría de estas variables fueron cuantificadas a partir de la base de datos de centros urbanos de GHS 2015, atributos multitemporales y multidimensionales, R2019A. Comisión Europea, Centro Común de Investigación (JRC) (Tabla 3).

Además de variables climáticas como temperatura y nivel de precipitación pluvial promedio, se cuenta con variables económicas como número de unidades económicas pertenecientes a la industria, comercio y servicios, y que dan evidencia de los cambios de uso del suelo urbano (en el sentido de la actividad económica). Mientras las unidades económicas relacionadas con la industria revelan la emisión de gases de efecto invernadero en cada ciudad, las unidades de comercio y servicios toman en consideración la actividad masiva en una ciudad y la cantidad de emisiones a la atmósfera de la actividad poblacional y la vehicular. Lo mismo sucede con las variables B y P que dan evidencia del tamaño urbano y su relación con las emisiones mencionadas.

Desde luego el PIB es siempre una variable económica clave en la comprensión de la relación

Tabla 3. Variables.

Variable	Descripción	Periodos	Unidad	Fuente
E_WR_T_	Temperatura media por año en la ciudad	1990, 2000 y 2015	°C	(Harris *et al.*, 2014)
E_WR_P_	Precipitación media por año en la ciudad	1990, 2000 y 2015	mm	
UE_IND	Unidades Económicas en Industria por Ciudad	1975, 1990, 2000 y 2015	personas	INEGI
UE_COM	Unidades Económicas en Comercio por Ciudad	1975, 1990, 2000 y 2015	personas	
UE_SERV	Unidades Económicas en Servicios por Ciudad	1975, 1990, 2000 y 2015	personas	
B	Superficie Urbanizada Total por Ciudad	1975, 1990, 2000 y 2015	km²	"GHS_BUILT_LDS _GLOBE_R2018A _54009_1K_V_1_0 (Florczyk et al., 2018)"
P	Población Residente Total por Ciudad	1975, 1990, 2000 y 2015	personas	"GHS_POP_GPW41E _GLOBE_R2018A _54009_1K_V_1_0 (Florczyk et al., 2018)"
GDP_SM	PIB a valores de la Paridad de Poder Adquisitivo (PPA) por año	1990, 2000 y 2015	$	(Kummu *et al.*, 2018)

entre el tamaño urbano y la posible alteración en el clima de la ciudad.

Propuesta de uso de matrices de correlación para los factores a observar

De igual manera, es crucial examinar la interacción entre estos elementos y su vínculo con la temperatura urbana. Para una comprensión integral de esto, se sugiere la elaboración de ciertas matrices de correlación. Es esencial tener en cuenta que una matriz de correlación es un instrumento estadístico que revela la fuerza y el sentido de la conexión entre dos o más variables. Esta herramienta es ampliamente utilizada en áreas como finanzas, economía, psicología, geografía y biología, ya que facilita la comprensión de cómo diversas variables se interrelacionan.

Matemáticamente, una matriz de correlación R para un conjunto de n variables aleatorias se define como una matriz n x n donde el elemento en la i-ésima fila y j-ésima columna es el coeficiente de correlación entre la i-ésima y la j-ésima variable aleatoria.

El coeficiente de correlación entre dos variables X e Y se calcula como:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\ \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

donde:

x_i y y_i son los valores individuales de las variables X e Y.

$\bar{x}$ y $\bar{y}$ son las medias de las variables X e Y.

n es el número de observaciones

Por lo tanto, la matriz de correlación R para un conjunto de n variables aleatorias X_1, X_2, …, X_n se ve así:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde cada r_{ij} es el coeficiente de correlación entre las variables X_i y X_j.

El coeficiente de correlación varía de -1 a +1, donde -1 representa una correlación negativa total, +1 representa una correlación positiva total y 0 indica que no existe correlación entre las variables.

Propuesta de un modelo econométrico de panel

Para proporcionar una prueba sólida de la posible correlación entre las variables económicas y demográficas sugeridas y la temperatura promedio de las ciudades, se sugiere la creación de un modelo econométrico de panel. Este fusiona datos de series temporales y secciones transversales. Se emplea cuando el conjunto de datos contiene información relacionada con una dimensión temporal T y una dimensión de unidad i (por ejemplo, empresa, individuo, grupo, etc.) y consta de K variables o regresores.

La forma funcional general de un modelo de panel es:

$$Y_{it} = \alpha + \beta_1 X_{1it} + e_{it} \quad (3)$$

Donde:

i representa la i-ésima unidad transversal (país, ciudad, región, persona, etc.)

t representa el tiempo t (año, trimestre, mes, etc.).

Este modelo permite la combinación de múltiples parámetros individuales y temporales.

Los coeficientes de las variables independientes indican el impacto de cada parámetro en la variable dependiente. Además, es crucial prestar atención al término de error, que recoge la variabilidad que el modelo no logra explicar.

En lo que respecta a las técnicas para realizar las corridas, generalmente se inicia con la estimación de un modelo de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) estándar denominado POOLED. Posteriormente, se estiman los efectos fijos y los efectos aleatorios. La elección entre uno de estos se basa en pruebas de hipótesis y en cuál de ellos se ajusta mejor a los datos. La prueba de Hausman es la mejor para decidir entre los efectos fijos y aleatorios.

Matemáticamente, la prueba de Hausman se puede expresar de la siguiente manera:

$$H=(b_{FE}-b_{RE})'[Var(b_{FE})-Var(b_{RE})]^{-1}(b_{FE}-b_{RE}) \quad (4)$$

Donde:

b_{FE} es el vector de coeficientes estimados por el modelo de efectos fijos.

b_{RE} es el vector de coeficientes estimados por el modelo de efectos aleatorios.

$Var(b_{FE})$ es la matriz de varianza-covarianza de b_{FE}.

$Var(b_{RE})$ es la matriz de varianza-covarianza de b_{RE}.

El estadístico de prueba *H* sigue una distribución chi-cuadrado con grados de libertad igual al número de coeficientes en el modelo.

La prueba de Hausman establece que no hay diferencias sistemáticas entre los coeficientes calculados por los modelos de efectos fijos y aleatorios, esto es, lo que se conoce como la hipótesis nula. Si el valor p obtenido en la prueba es menor a 0.05, se descarta la hipótesis nula, lo que indica que los efectos fijos son los más adecuados. En cambio, si el valor p supera el 0.05, la hipótesis nula se mantiene, lo que sugiere que los efectos aleatorios, serían la mejor opción.

RESULTADOS

Se presentan ahora las matrices de correlación entre los factores asociados más importantes (Tablas 4 al 7). Cada matriz contiene información de estas variables por tamaño de ciudad, esto es, una matriz por la megalópolis que existe en México (la ZMCM), otra para ciudades grandes, otra para ciudades medias y, finalmente, una para ciudades pequeñas. A continuación, las tablas 4 al 7 muestran los niveles de asociación estas variables en cada estrato de tamaño. La descripción de las variables de las Tablas 4 al 7 pueden consultarse en la Tabla 3.

Es claro que el tamaño de la ciudad revela características climatológicas diferentes. Mientras en una ciudad grande o muy grande es notoria la importante relación entre niveles de precipitación y temperatura con diferentes variables asociadas al tamaño (población residente, superficie urbanizada, unidades de industria, comercio o servicios), esto no ocurre con ciudades medias o pequeñas. Esto podría revelar que la poca actividad económica de ciudades medias o pequeñas no implica impactos al clima por factores como la industria o la cantidad de vehículos o personas residentes. Esto sugiere que, la actividad económica urbana a gran escala sí muestra, como se asegura en la evidencia empírica presentada por Jáuregui y por otros investigadores, suficientes emisiones de con-

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson por variable y estrato de tamaño urbano. Magelópolis.

	E_WR_T_	E_WR_P_	UE_IND	UE_COM	UE_SERV	B	P	GDP_SM
E_WR_T_	1.0000							
E_WR_P_	-0.0054	1.0000						
UE_IND	0.8322	0.5499	1.0000					
UE_COM	0.9967	0.0761	0.4741	1.0000				
UE_SERV	0.9826	0.1806	0.5961	0.9895	1.0000			
B	0.9780	-0.2141	0.3737	0.9759	0.9494	1.0000		
P	0.9644	-0.2698	0.0764	0.9109	0.8439	0.9133	1.0000	
GDP_SM	0.6592	-0.7555	0.1316	0.5957	0.5079	0.8017	0.8347	1.0000

Fuente: elaboración propia a partir de datos de base de datos de centros urbanos de ghs 2015, atributos multitemporales y multidimensionales, R2019A. Comisión Europea, Centro Común de Investigación (JRC). Las variables de Unidades Económicas (UE) son de elaboración propia a partir de Censos Económicos de INEGI.

Tabla 5. Coeficientes de correlación de Pearson por variable y estrato de tamaño urbano. Ciudades grandes.

	E_WR_T_	E_WR_P_	UE_IND	UE_COM	UE_SERV	B	P	GDP_SM
E_WR_T_	1.0000							
E_WR_P_	-0.3480	1.0000						
UE_IND	0.2314	0.7444	1.0000					
UE_COM	0.2526	0.6909	0.6029	1.0000				
UE_SERV	0.3708	0.5374	0.5517	0.9618	1.0000			
B	0.5837	-0.0145	0.2527	0.5111	0.5760	1.0000		
P	0.6744	0.3238	0.6154	0.7760	0.8019	0.7816	1.0000	
GDP_SM	0.7645	0.0198	0.3489	0.4913	0.5946	0.8133	0.8798	1.0000

Fuente: elaboración Propia a partir de datos de Base de datos de centros urbanos de GHS 2015, atributos multitemporales y multidimensionales, R2019A.Comisión Europea, Centro Común de Investigación (JRC). Las variables de Unidades Económicas (UE) son de elaboración propia a partir de Censos Económicos de INEGI.

Tabla 6. Coeficientes de correlación de Pearson por variable y estrato de tamaño urbano. Ciudades medias.

	E_WR_T_	E_WR_P_	UE_IND	UE_COM	UE_SERV	B	P	GDP_SM
E_WR_T_	1.0000							
E_WR_P_	0.4373	1.0000						
UE_IND	-0.1980	-0.0407	1.0000					
UE_COM	-0.0787	0.0463	0.7077	1.0000				
UE_SERV	-0.0084	0.0479	0.6601	0.8644	1.0000			
B	0.0621	-0.1746	0.2694	0.2862	0.4885	1.0000		
P	-0.0281	-0.1275	0.3598	0.2891	0.5364	0.8358	1.0000	
GDP_SM	0.1004	-0.0926	0.3783	0.4683	0.5373	0.6867	0.7475	1.0000

Fuente: elaboración Propia a partir de datos de Base de datos de centros urbanos de GHS 2015, atributos multitemporales y multidimensionales, R2019A. Comisión Europea, Centro Común de Investigación (JRC). Las variables de Unidades Económicas (UE) son de elaboración propia a partir de Censos Económicos de INEGI.

Tabla 7. Coeficientes de correlación de Pearson por variable y estrato de tamaño urbano. Ciudades pequeñas.

	E_WR_T_	E_WR_P_	UE_IND	UE_COM	UE_SERV	B	P	GDP_SM
E_WR_T_	1.0000							
E_WR_P_	0.3174	1.0000						
UE_IND	-0.1167	0.0860	1.0000					
UE_COM	-0.1711	0.1551	0.3050	1.0000				
UE_SERV	-0.0531	0.1500	0.2865	0.7780	1.0000			
B	0.1353	-0.0674	-0.1359	0.2732	0.2528	1.0000		
P	0.0877	0.1933	-0.0122	0.5161	0.4974	0.5877	1.0000	
GDP_SM	0.1553	-0.1034	-0.1380	0.0825	0.2097	0.4968	0.5775	1.0000

Fuente: elaboración Propia a partir de datos de Base de datos de centros urbanos de GHS 2015, atributos multitemporales y multidimensionales, R2019A. Comisión Europea, Centro Común de Investigación (JRC). Las variables de Unidades Económicas (UE) son de elaboración propia a partir de Censos Económicos de INEGI.

taminantes y otras sustancias en general, además de incrementar las superficies reflejantes (concreto, cemento, etc.) que alteran el clima en ciudades, al grado de incrementar la temperatura en ciudades grandes. Esta evidencia no es observada en ciudades medias ni pequeñas, porque no existe suficiente parque vehicular, población residente ni actividad industrial que dé lugar a la alteración climática observada en otras escalas urbanas.

Con lo anterior claramente el tamaño urbano representa un factor importante en la asociación entre impactos al clima urbano y la actividad de la ciudad.

Estos hechos sugieren entonces que, además de localización geográfica y tamaño de la ciudad, existen factores que impactan en el clima de la ciudad, pero específicamente lo hacen en ciudades de gran tamaño dada su actividad industrial o poblacional.

Ahora bien, con relación al modelo econométrico de panel y sus resultados se tiene lo siguiente. Es posible hacer muchas combinaciones con las variables propuestas, no obstante, se optó por ocupar únicamente las más importantes, dado que la mayoría de ellas presentan fuertes niveles de correlación, con los que se presentarían altos grados de multicolinealidad. Por ejemplo, no tendría sentido introducir al modelo las variables UE_IND y PO_IND (unidades económicas de industria y población económica industrial) dado que, aunque miden diferentes efectos relacionados con la industria, tienden a presentar resultados similares dado que, si uno se incrementa, el otro también lo hará y de allí que su coeficiente de correlación sea alto. Debe recordarse que es conveniente que entre variables explicativas es importante que se mantengan correlaciones bajas.

Se hicieron corridas econométricas con el programa Stata para las variables independientes más relevantes, las cuales resultaron unidades económicas de industria, de comercio, la población residente y el estrato de tamaño (UE_IND, UE_COM, P y Estrato) para la variable dependiente de temperatura media de cada ciudad (E_WR_T_). Asimismo, se corrió una prueba de Hausman para decidir si es más adecuado el modelo de efectos fijos o el de efectos aleatorios.

El parámetro calculado para la prueba de Hausman fue de H=52.12, con lo que es mejor tomar el modelo de efectos fijos. Esto es congruente con el diseño econométrico del modelo dado que, es importante recordar que los efectos fijos en un modelo de panel reflejan la heterogeneidad entre individuos, en este caso, entre ciudades mexicanas, las cuales evidentemente resultan diferentes unas de otras dada su localización, tamaño, actividad económica, condiciones geográficas, etc. De allí que los efectos fijos sean más adecuados para la modelación. Es así como el modelo final, de efectos fijos, se presenta en la Tabla 8.

Donde la variable dependiente E_WR_T_ es la temperatura promedio de cada año en cada ciudad. Las variables independientes UE_IND, UE_COM, P y Estrato representan las unidades económicas en industria por ciudad, unidades económicas en comercio

Tabla 8. Corrida econométrica.

Regresión de efectos fijos Variable de identificación de individuos: id	Número de observaciones: 396 Número de individuos: 132
R^2 = 0.2305	Parámetro F F(4,260) = 19.47

E_WR_T_	Coef.	Std. Err.	t	P>|t|	[95% Conf. Interval]
UE_IND	0.0001214	0.0000303	4.00	0.000	.0000616 .0001811
UE_COM	-0.0000307	0.00000645	-4.76	0.000	-.0000434 -.000018
P	0.00000156	0.000000264	5.89	0.000	1.04e-06 2.08e-06
Estrato	-0.2581388	0.0644397	-4.01	0.000	-.385029 -.1312487
_cons	21.62608	0.2622564	82.46	0.000	21.10966 22.1425

por ciudad, población residente total por ciudad y el estrato de tamaño, respectivamente (Tabla 3).

Los resultados más relevantes del modelo se plantean como sigue:

1. Coeficientes y significancia estadística: todas las variables independientes, esto es unidades económicas de industria, de comercio, población total y estrato de tamaño (UE_IND, UE_COM, P y Estrato) son estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99.9% (P>|t| = 0.000). Esto significa que estas variables tienen un efecto significativo en la variable dependiente, es decir, temperatura media de cada ciudad (E_WR_T_).

- UE_IND: un aumento de una unidad en el número de establecimientos industriales aumenta la temperatura promedio de la ciudad en 0.0001214 grados centígrados, manteniendo constantes las demás variables.
- UE_COM: un aumento de una unidad en el número de establecimientos comerciales disminuye la temperatura promedio de la ciudad en 0.0000307 grados centígrados, manteniendo constantes las demás variables.
- P: un aumento de una persona en la Población Residente aumenta la temperatura promedio de la ciudad en 1.56e-06 grados centígrados, manteniendo constantes las demás variables.
- Estrato: aumentar un nivel en el estrato de tamaño urbano (es decir, avanzar a estratos de ciudades cada vez menores) disminuye la temperatura promedio de la ciudad en 0.2581388 grados centígrados. O, lo que es lo mismo, en la medida que una ciudad aumenta su tamaño hasta cambiar de estrato, pasando de ser ciudad media a ciudad grande (por ejemplo) aumenta su temperatura en la cuarta parte de un grado centígrado, manteniendo constantes las demás variables.

2. R cuadrado (R^2): el R cuadrado dentro del grupo (within) es 0.2305, lo que indica que el 23.05% de la variación en la temperatura promedio de la ciudad se puede explicar por las variables independientes del modelo dentro de los grupos. El R^2 entre grupos (between) es 0.0336, lo que indica que solo el 3.36% de la variación en la temperatura promedio de la ciudad se puede explicar por las diferencias entre los grupos. El R^2 general (overall) es 0.0326, lo que indica que el modelo explica el 3.26% de la variación en la temperatura promedio de la ciudad en toda la muestra.

3. Prueba F: la prueba F es significativa (Prob > F = 0.0000), lo que indica que al menos una de las variables independientes tiene un efecto significativo en la temperatura promedio de la ciudad.

4. Prueba F para u_i=0: la prueba F para u_i=0 es significativa (Prob > F = 0.0000), lo que indica que los efectos individuales son significativos, es decir, hay diferencias significativas entre las ciudades.

5. Correlación entre los efectos individuales y las variables explicativas: la correlación entre los efectos individuales y las variables explicativas es -0.6374, lo que indica una correlación negativa moderada.

6. Varianza de los efectos individuales y del error: la varianza de los efectos individuales (sigma_u) es 4.8488916 y la varianza del término de error (sigma_e) es 0.29712097. Esto sugiere que la mayor parte de la variación en la temperatura promedio de la ciudad se debe a las diferencias entre las ciudades tomadas en la muestra.

DISCUSIÓN

Más allá de los resultados técnicos del modelo econométrico, o de los coeficientes de correlación, es importante ahora hacer algunas reflexiones sobre sus implicaciones.

Es claro que la evidencia empírica presentada por diferentes autores en la discusión presente, tal como lo que han mostrado Jáuregui y Kalnay, entre otros, misma que ha apuntado al incremento paulatino de la temperatura en los espacios urbanos, se confirma con los resultados aquí presentados, esto es, las ciudades están incrementando su temperatura media. Si bien esto ya ha sido medido en muchas ciudades a lo largo del mundo, en México aún se no cuenta con suficiente información. Quizá los trabajos más importantes en términos generales son los que ha aportado Jáuregui, quien lo ha hecho específicamente para la ZM de la Ciudad de México al registrar estos cambios a lo largo de su proceso histórico de expansión, sin embargo, para otras ciu-

dades mexicanas de gran tamaño, como lo son las Zonas Metropolitanas de Guadalajara, Monterrey, y aún otras como la de Puebla o la de Tijuana, no se cuenta con suficiente evidencia empírica que señale las posibles implicaciones en el futuro, ni siquiera en el momento actual es posible saber los impactos del crecimiento urbano en el campo climático. De allí la necesidad de incrementar el interés por el estudio del clima urbano, específicamente de aquellas altamente susceptibles de fuertes impactos como lo son las ciudades más grandes en México.

Ahora bien, las variables encontradas en la base de datos del proyecto europeo GHS Urban Centre Database 2015 revelan la fuerte asociación entre la temperatura urbana y factores como la expansión urbana a lo largo del tiempo, el crecimiento de la población y sus actividades reflejadas en un aumento del transporte privado (automóviles) y otros factores como la actividad industrial de las grandes ciudades. En el modelo es posible comprobar que las ciudades de más de un millón de habitantes son altamente susceptibles al continuo aumento de la población (de allí que resulte significativa estadísticamente). El aumento de la población o de la actividad económica, como la industria, implican también crecimiento en el uso del transporte y en la creación de infraestructura urbana que reducen el verdor y las superficies vegetales que pueden refrescar el ambiente de las ciudades. Es por ello que las ciudades, entre otras razones, no deberían crecer más allá de cierto límite.

Con relación al modelo econométrico, la conclusión que puede darse es que comprueba, más allá de toda duda razonable, que las ciudades más grandes e importantes, debido a sus actividades y diversificación económica, desde el punto de vista estrictamente económico, puede aparentar contar con un tamaño urbano satisfactorio, sin embargo, desde otros aspectos, claramente el tamaño implica problemáticas importantes. Y estas no parecen aún ser atendidas en los planes de los gobiernos respectivos, lo que da evidencia de la poca conciencia o interés de las autoridades.

Lo que queda como materia pendiente de la perspectiva de la investigación es tratar de imaginar el futuro de las ciudades con estas problemáticas sin atender, ¿Es viable una ciudad de varios millones de habitantes con relación a su clima en un horizonte temporal de 30 o 50 años? Es una respuesta que debe ser buscada tan pronto como sea posible.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó gracias al programa de la Universidad Nacional Autónoma de México-Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA)-Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT)-IN304120 “Crecimiento y expansión urbana en México al 2040. Análisis prospectivo y estimación de datos sobre economía, medio ambiente, población y expansión de las ciudades mexicanas”.

El autor agradece a la Mtra. Karina Garduño Maya, académica del IIEc UNAM y a Verónica Ameyalli Rodríguez Hernández, Zyanya Mariana Gutiérrez Rojas y Ana Rocío López Acosta, alumnas de la Facultad de Economía de la UNAM por el apoyo en la elaboración de la base de datos para este trabajo.

REFERENCIAS

Brimblecombe, P. (2014). *Urban air pollution and public health.* En *Environmental Science for Environmental Management* (pp. 399-416). Routledge.

Castro-Mendoza, I., Valdez-Lazalde, J. R., Donovan, G., Martínez Trinidad, T., Plascencia Escalante, F. O. y Vázquez Morales, W. (2022). ¿El uso de suelo afecta la distribución de temperatura en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México? *Investigaciones Geográficas*, (107).

Córdova Sáez, K. (2011). Impactos de las islas térmicas o islas de calor urbano, en el ambiente y la salud humana: Análisis estacional comparativo: Caracas, octubre-2009, marzo-2010. *Terra, 27*(42), 95-122.

Fall, S., Niyogi, D., Gluhovsky, A., Pielke Sr, R. A., Kalnay, E. y Rochon, G. (2010). Impacts of land use land cover on temperature trends over the continental United States: assessment using the North American Regional Reanalysis. *International Journal of Climatology, 30*(13), 1980-1993. https://doi.org/10.1002/joc.1996

Ferrelli, F., Bustos, M. L. y Piccolo, M. C. (2016). La expansión urbana y sus impactos sobre el clima y la sociedad de la ciudad de Bahía Blanca, Argentina.

Estudios Geográficos, 77(281), 469-489. https://doi.org/10.3989/estgeogr.201615

Florczyk, A. J., Corbane, C., Schiavina, M., Pesaresi, M., Maffenini, L., Melchiorri, M., Politis, P., Sabo, F., Freire, S., Ehrlich, D., Kemper, T., Tommasi, P., Airaghi, D. y L. Zanchetta. (2019). Base de datos de centros urbanos de GHS 2015, atributos multitemporales y multidimensionales, R2019A. Comisión Europea, Centro Común de Investigación (JRC) [Conjunto de datos] PID: http://data.europa.eu/89h/53473144-b88c-44bc-b4a3-4583ed1f547e

García, F. F. y Martilli, A. (2012). El clima urbano: aspectos generales y su aplicación en el área de Madrid. *Revista Índice*, (50), 21-24.

Georgescu, M., Morefield, P. E., Bierwagen, B. G. y Weaver, C. P. (2014). Urban adaptation can roll back warming of emerging megapolitan regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 111*(8), 2909-2914. https://doi.org/10.1073/pnas.1322280111

Gosselin, H. M. (2001). *A framework for determining the compatability of wildlife with urban stormwater management practices*. Doctoral dissertation, University of Guelph.

Henríquez, C. (2014). *Modelando el crecimiento de ciudades medias: Hacia un desarrollo urbano sustentable*. Ediciones UC.

Jáuregui Ostos, E. (2004). Impacto del uso del suelo en el clima de la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas*, (55), 46-60.

Jáuregui Ostos, E. (1979). La isla de calor en Toluca. *Investigaciones Geográficas*, (9), 27-37. https://doi.org/10.14350/rig.58913

Jáuregui Ostos, E. (1974). Las investigaciones sobre clima urbano y contaminación del aire en la República Federal de Alemania. *Investigaciones Geográficas*, (5), 71-89. https://doi.org/10.14350/rig.58878

Jáuregui Ostos, E. y Heres Pulido, M. E. (2008). Las ondas de calor en la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas*, (67), 71-76.

Jáuregui Ostos, E. (1995). Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la ciudad de México debidas a la urbanización. Revisión y perspectivas. *Investigaciones Geográficas*, (31), 9-44. https://doi.org/10.14350/rig.59035

Juan Pérez, J. I. (2017). Identificación y evaluación de impactos ambientales en el Campus Ciudad Universitaria, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec, Toluca México. *Acta Universitaria, 27*(3), 36-56. de Coatepec, Toluca México. *Acta Universitaria*, *27*(3), 36-56. https://doi.org/10.15174/au.2017.1249

Kalnay, E. y Cai, M. (2003). Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature, 423*(6939), 528-531. https://doi.org/10.1038/nature01675

Katul, G. G., Oren, R., Manzoni, S., Higgins, C. y Parlange, M. B. (2012). Evapotranspiration: a process driving mass transport and energy exchange in the soil-plant-atmosphere-climate system. *Reviews of Geophysics, 50*(3). https://doi.org/10.1029/2011RG000366

López Velasco, R., Espino, G. T., & de La Parra, A. M. (2018). Adaptación de activos al cambio climático en el Sistema Urbano Lagunar de Coyuca, México: hacia la resiliencia climática en ciudades costeras. *Medio Ambiente y Urbanización, 88*(1), 177-198.

Moliní, F. y Salgado, M. (2012). Los impactos ambientales de la ciudad de baja densidad en relación con los de la ciudad compacta. *Biblio 3W. Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales, 17*(958).

Novillo Rameix, N. (2018). Cambio climático y conflictos socioambientales en ciudades intermedias de América Latina y el Caribe. Letras Verdes. *Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (24), 124-142. https://doi.org/10.17141/letrasverdes.24.2018.3323

Oltra, C. y Marín, R. (2013). Los retos en la adaptación al cambio climático en entornos urbanos. Papers. *Revista de Sociología, 98*(2), 311-330. https://doi.org/10.5565/rev/papers/v98n2.498

Rodríguez, R. A., Virguez, E. A., Rodríguez, P. A., & Behrentz, E. (2016). Influence of driving patterns on vehicle emissions: A case study for Latin American cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, (43), 192-206. https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.12.008

Rueda, V. O. M. y García, C. G. (2002). Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambientales, sociales y económicos. *Gaceta Ecológica*, (65), 7-23.

Sailor, D. J., Georgescu, M., Milne, J. M. y Hart, M. A. (2015). Development of a national anthropogenic heating database with an extrapolation for international cities. *Atmospheric Environment*, (118), 7-18. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.07.016

Sánchez Vargas, A., Gay García, C. y Estrada Porrúa, F. (2011). Cambio climático y pobreza en el Distrito Federal. *Revista Investigación Económica, LXX* (278), 45-74.

Stone Jr, B., Vargo, J., Liu, P., Habeeb, D., DeLucia, A., Trail, M., ... y Russell, A. (2014). Avoided heat-related mortality through climate adaptation strategies in three US cities. *PloS One, 9*(6), e100852. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100852

Ulloa, H., García, M., Pérez, A., Meulenert, A. y Ávila, D. (2011). Clima y radiación solar en las grandes ciudades: Zona Metropolitana de Guadalajara (Estado de Jalisco, México). *Investigaciones Geográficas*, (56), 165-175. https://doi.org/10.14198/INGEO2011.56.09

Vargas, N. y Magaña, V. (2020). Climatic risk in the Mexico City metropolitan area due to urbanization. *Urban Climate*, (33), 100644. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100644

Vásquez, A., de la Parra, A. M., Checa, K. C., Castillo, M. D., de Lima, A. B., Almeida, O. y Arguello, D. (2018). La Perspectiva de Género ¿Una consideración necesaria para comprender y transformar estructuras de desigualdad en el contexto del cambio climático? Aportes de la iniciativa Ciudades Resilientes al Clima en América Latina. *Medio Ambiente y Urbanización, 88*(1), 199-245.

Zaragoza Badillo, J. y Guzmán, J. R. (2023). Economía, crecimiento urbano y el cambio climático local en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Inter Disciplina, 11*(29), 311-332. https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2023.29.84493

Zhang, K., Wang, R., Shen, C. y Da, L. (2010). Temporal and spatial characteristics of the urban heat island during rapid urbanization in Shanghai, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, (169), 101-112. https://doi.org/10.1007/s10661-009-1154-8

Zúñiga Tovar, A. E. y Magaña Rueda, V. O. (2018). Vulnerabilidad y riesgo por lluvias intensas en México: el efecto del cambio en la cobertura del uso del suelo. *Investigaciones Geográficas*, (95). DOI: https://doi.org/10.14350/rig.59465

ANEXO 1

Jerarquía en el SUN	Ciudad (SUN 2015)	Población urbana total est 2015
1	ZM Ciudad de México, Edomex, CDMX, Hidalgo	20,446,496
2	ZM Guadalajara, Jalisco	4,551,183
3	ZM Monterrey, Nuevo León	4,332,343
4	ZM Puebla-Tlaxcala, Puebla y Tlaxcala	2,785,853
5	ZM Toluca, México	1,776,648
7	ZM León, Guanajuato	1,709,487
8	ZM Juárez, Chihuahua	1,418,808
9	ZM La Laguna, Coahuila de Zaragoza y Durango	1,283,265
10	ZM San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí	1,132,657
11	ZM Querétaro, Querétaro	1,125,027
12	ZM Mérida, Yucatán	1,085,652
13	ZM de Aguascalientes, Aguascalientes	1,015,363
14	ZM Cuernavaca, Morelos	952,307
15	ZM Mexicali, Baja California	946,682
16	ZM Saltillo, Coahuila de Zaragoza	904,481
17	ZM Chihuahua, Chihuahua	902,240
18	ZM Tampico, Tamaulipas y Veracruz de Ignacio de la Llave	871,458
19	ZM Acapulco, Guerrero	855,807
20	ZM Morelia, Michoacán de Ocampo	853,997
21	Hermosillo	782,163
22	ZM Reynosa-Río Bravo, Tamaulipas	775,625
23	ZM Veracruz, Veracruz de Ignacio de la Llave	771,409
24	ZM Cancún, Quintana Roo	766,805
25	ZM Villahermosa, Tabasco	758,502
26	Culiacán Rosales	739,124
27	ZM Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	722,020
28	ZM Xalapa, Veracruz de Ignacio de la Llave	690,356
29	ZM Celaya, Guanajuato	625,948
30	ZM Oaxaca, Oaxaca	597,572
31	Victoria de Durango	565,296
32	ZM Pachuca, Hidalgo	552,243
33	ZM Tlaxcala-Apizaco, Tlaxcala	516,717
34	ZM Matamoros, Tamaulipas	511,285
35	ZM Poza Rica, Veracruz de Ignacio de la Llave	495,743
36	ZM Tepic, Nayarit	456,612
37	ZM Cuautla, Morelos	453,460

Jerarquía en el SUN	Ciudad (SUN 2015)	Población urbana total est 2015
38	ZM Orizaba, Veracruz de Ignacio de la Llave	426,070
39	Irapuato	414,993
40	Mazatlán	410,670
41	ZM Nuevo Laredo, Tamaulipas	402,906
42	ZM Puerto Vallarta, Jalisco y Nayarit	380,271
43	ZM Colima-Villa de Álvarez, Colima	354,630
44	ZM Minatitlán, Veracruz de Ignacio de la Llave	349,928
45	ZM Coatzacoalcos, Veracruz de Ignacio de la Llave	340,641
46	ZM Zacatecas-Guadalupe, Zacatecas	338,759
47	ZM Monclova-Frontera, Coahuila de Zaragoza	332,243
48	ZM Córdoba, Veracruz de Ignacio de la Llave	320,698
49	Ciudad Victoria	318,342
50	Ciudad Obregón	313,637
51	ZM Tehuacán, Puebla	308,406
52	Ensenada	304,146
53	Uruapan	281,434
54	Los Mochis	276,537
55	ZM Zamora-Jacona, Michoacán de Ocampo	260,726
56	ZM La Piedad-Pénjamo, Michoacán de Ocampo y Guanajuato	252,981
57	ZM Tulancingo, Hidalgo	251,831
58	Heroica Nogales	235,584
59	Campeche	234,550
60	La Paz	232,001
61	Playa del Carmen	213,817
62	Tapachula de Córdova y Ordóñez	209,979
63	Chilpancingo de los Bravo	205,591
64	ZM Guaymas, Sonora	204,140
65	ZM Tula, Hidalgo	199,371
67	ZM Piedras Negras, Coahuila de Zaragoza	193,581
68	Ciudad del Carmen	180,023
69	San Cristóbal de las Casas	170,292
71	San Luis Río Colorado	167,128
73	Salamanca	160,425
74	Chetumal	159,888
75	San Juan del Río	157,102
76	ZM Ocotlán, Jalisco	149,786
77	Ciudad Acuña	146,654
78	Manzanillo	144,175

Jerarquía en el SUN	Ciudad (SUN 2015)	Población urbana total est 2015
79	Ciudad Lázaro Cárdenas	143,611
80	ZM Tecomán, Colima	140,480
81	ZM Ríoverde-Ciudad Fernández, San Luis Potosí	139,621
82	Fresnillo	131,639
83	Ciudad Valles	130,366
84	ZM Teziutlán, Puebla	130,052
85	Iguala de la Independencia	125,454
86	Cuauhtémoc	124,329
87	Delicias	123,198
88	Cabo San Lucas	117,800
89	Navojoa	117,327
90	ZM Acayucan, Veracruz de Ignacio de la Llave	112,630
91	Hidalgo del Parral	109,246
92	ZM Moroleón-Uriangato, Guanajuato	108,300
93	Comitán de Domínguez	105,206
94	Lagos de Moreno	104,674
95	Ciudad Guzmán	104,621
97	San Juan Bautista Tuxtepec	102,705
98	Guanajuato	102,365
99	Apatzingán de la Constitución	100,672
100	San José del Cabo	97,524
101	Tepatitlán de Morelos	95,338
102	Atlixco	87,992
103	Cárdenas (Tabasco)	85,826
104	Zitácuaro	85,594
105	Agua Prieta	83,859
106	Ciudad Mante	82,108
107	Matehuala	81,873
108	Heroica Ciudad de Juchitán de Zaragoza	81,274
109	Cozumel	80,795
110	Martínez de la Torre	78,077
111	Guasave	74,448
112	San Miguel de Allende	71,119
113	Valle de Santiago	70,322
115	Zihuatanejo	69,063
116	Sahuayo de Morelos	67,177
117	Linares	66,641
118	Ciudad Hidalgo	65,806

Jerarquía en el SUN	Ciudad (SUN 2015)	Población urbana total est 2015
119	Cortazar	65,400
120	Guamúchil	64,474
121	Heroica Caborca	63,647
122	San Andrés Tuxtla	63,092
123	Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia Nacional	63,048
124	Puerto Peñasco	59,463
125	Nuevo Casas Grandes	58,706
126	Pátzcuaro	57,989
127	Huauchinango	57,565
128	Acámbaro	57,280
130	Huamantla	55,794
131	Arandas	55,786
133	Heroica Ciudad de Huajuapan de León	54,580
135	Tlapa de Comonfort	52,903
137	Valladolid	52,599
139	Taxco de Alarcón	51,299
140	San Juan de los Lagos	51,053
141	San Luis de la Paz	50,894
145	San Pedro	49,116
149	Tierra Blanca	47,427