

Dinámica espacio-temporal de la isla de calor urbana en la Ciudad de México

Urban heat island spatio-temporal dynamics in the city of Mexico

¹Isabel Larena de Mora

RESUMEN

Hasta ahora, el conocimiento de la configuración y la conformación de la Isla de Calor Urbano (ICU) en el área metropolitana de Ciudad de México es un problema no abordado por las autoridades. Es por ello, que este artículo tiene como objetivo prioritario caracterizar la dinámica de la Isla de Calor Urbana en Ciudad de México y su área urbanizada limítrofe perteneciente al colindante Estado de México, tanto en el tiempo como en el espacio. Para su elaboración se han utilizado los registros de las estaciones meteorológicas activas pertenecientes al Gobierno de la Ciudad de México en función de algunas variables climáticas desde 1988 a 2019. Su obtención y uso, junto con la aplicación de una serie de procedimientos de análisis geoestadístico a cargo del programa de información geográfica, ArcGIS®, han permitido elaborar un conjunto de planos acotados bajo una serie de criterios de selección predefinidos que han permitido visualizar el fenómeno de la Isla de Calor y su dinámica. El conocimiento de los patrones espaciales típicos de las ICUs resulta fundamental para conocer las intensidades y configuraciones más habituales de ella y proponer medidas de mitigación. Esto será clave para la disposición de medidas de planificación para la prevención y mitigación frente al cambio climático a corto plazo y serán necesarias para mejorar el confort térmico de los ciudadanos en los espacios exteriores urbanos según el objetivo ODS número 13 "Acción por el clima".

Palabras clave

Isla de calor urbana, Ciudad de México, Dinámica espacio-temporal, Usos del suelo, ODS 1.

ABSTRACT

Until now, Urban Heat Island (UHI) configurations in the metropolitan area of Mexico City have not been well analyzed. For this reason, the main objective of the research reported in this article is to characterize Urban Heat Island dynamics, both in time and in space, in Mexico City and neighboring urbanized areas belonging to the adjacent State of Mexico. Records of active meteorological stations belonging to the Government of Mexico City, including databases for climatic variables from 1988 to 2019, have been used for its elaboration. A set of maps was elaborated with the application of a series of geostatistical analysis procedures using the geographic information program, ArcGIS®, under a series of predefined selection criteria within a temporal and spatial framework. This has made it possible to visualize the Heat Island phenomenon and its dynamics. Knowledge of the typical spatial patterns of UHI is fundamental to know the most common intensities and configurations and to propose mitigation measures. This will be key to the provision of planning measures for the prevention and mitigation of climate change in the short term and will be necessary to improve the thermal comfort of citizens in urban outdoor spaces according to SDG 13 "Climate Action".

Keywords

Urban Heat Island, Mexico City, Spatio-temporal dynamics, Land use, SDG 1

INTRODUCCIÓN

El estudio de la ciudad y su relación con el espacio implica un doble proceso, de concentración de población y de expansión espacial sobre un territorio al que va modificando drásticamente (Martínez, 2014), y en el que van apareciendo nuevas situaciones que a su vez condicionan la vida urbana de las personas. La ciudad se sitúa como un gran transformador climático responsable de modificaciones en los balances de radiación del suelo y del aire, con importantes consecuencias para la salud de la población. El resultado de estas acciones sobre el ambiente urbano es notorio ya que por la emisión de gases aparece el efecto invernadero, y el recalentamiento de las zonas urbanas creándose un microclima específico y singular, el microclima urbano (Higueras & Aram, 2019). Como se recoge en numerosos informes internacionales, con un área urbanizada que ocupa apenas un 2% de la superficie terrestre, ésta es capaz de consumir más del 75% de los recursos naturales y de ella procede más del 80% de las emisiones de gases a la atmósfera (Simioni, 2003).

El continuado proceso de urbanización y el elevado número de personas que viven en las ciudades ha dado lugar a la necesidad de desarrollar una serie de acciones dirigidas al estudio del efecto de las islas de calor urbanas. Los entornos que se ven afectados directamente por el clima urbano característico son resultado de ser colindes a las grandes urbes y, sus rasgos más sobresalientes son el aumento de la temperatura en relación con las áreas próximas, la reducción de la humedad ambiental y la generación de turbulencias en los flujos de viento. Es por ello que se desarrolló un estudio, cuyo objetivo central fue conocer la dinámica espacial y temporal de la isla de calor urbana (Fernández et al., 2016) de la ciudad de México y su entorno.

En los años sesenta la ciudad sobrepasó los límites del Distrito Federal y ocupó territorio del Estado de México. Desde el año 2000 se extiende sobre el Distrito Federal y 17 municipios del Estado.

En el siglo XX el proceso de crecimiento tanto en superficie como en población fue continuo, creciente y destacado. En la década de 1940, de 1950 y 1960, la población volvió a aumentar a 3.283.014 habitantes en el área urbana, de los cuales el 68% se encontraban en la ciudad central, y el 20,3% en delegaciones contiguas. La ciudad se extendió a las delegaciones periféricas en 1970 y sobrepasó los límites del Distrito Federal hacia el norte, la superficie ocupada aumentó de 660 km² en 1970 a 1.025 km² en 1980 (Figura 1), con una densidad bruta de la población en 135 hab/Ha. El Plan de 1980 aumentó la intensidad del uso del suelo (cantidad de construcción permitida en un predio) hasta 10 veces la superficie del predio, lo cual promovió la especulación de la tierra, pero en 1986, tras el fuerte sismo del 1985, se redujeron las alturas permitidas en la construcción y la intensidad del uso del suelo guiado por el Programa General de desarrollo Urbano del Distrito Federal (Cervantes, 2016).

El importante crecimiento espacial de las zonas construidas, han sido determinantes para la delimitación de la Isla de Calor Urbana de la Ciudad de México, objetivo físico de la presente investigación, dentro del periodo comprendido entre 1988-2019, objetivo temporal de la presente investigación.

MARCO TEÓRICO

Islas de Calor Urbano (ICU): Una de las modificaciones del clima que mejor se conocen y que más estudiada ha sido es el fenómeno de la isla de calor urbana (ICU). En 1817, Luke Howard, fue el primer investigador en descubrir la modificación térmica que presentaba Londres (Moreno, 2016) Otro estudioso sobre el tema fue el francés Emilien Renou (1815-1902) quien detecta el calentamiento anómalo del centro de París con respecto a la periferia (Moreno, 2016, p. 2). Posteriormente, Gordon Manley, denominará esta modificación térmica por primera vez como isla de calor urbana (Martínez, 2014). Así pues, la ICU (UHI, Urban Heat Island) es un fenómeno térmico que se desarrolla en las áreas urbanas causado por la diferencia de temperatura existente entre los sectores más densamente edificados de la ciudad y sus alrededores.

La descripción de la ICU se puede realizar atendiendo a tres parámetros: intensidad, forma o configuración y máximo térmico (Cuadrat et al., 1993; Cuadrat & Vicente-Serrano, 2008).

- La intensidad de la ICU es una medida de su fuerza o magnitud y se refiere a la máxima diferencia de temperatura que es capaz de alcanzar.
- La forma o la configuración se refiere a la distribución espacial de las isotermas, las cuales suelen tomar un patrón espacial similar al de una isla que se ajusta de forma concéntrica a la ciudad.

- El máximo térmico es el ámbito de la ciudad donde se produce la mayor diferencia de temperatura, es decir se alcanza la mayor intensidad (Jauregui, 1995).

Estas variables también resultan determinantes y relacionan positivamente las ICU con las Olas de Calor, fenómeno documentado por su reciente notoriedad y gravedad en muchas ciudades, tales como Beijing, Nueva York o Atenas (Hidalgo-García y Arco-Díaz, 2022).

Figura 1.

Población por delegaciones y Municipios 1950-1980, Zona Metropolitana de Ciudad de México.

| | 1950 | 1960 | 1970 | 1980 |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Ciudad Central | 2.234.795 | 2.832.133 | 2.902.969 | 2.595.823 |
| Delegaciones Contiguas | 666.444 | 1.792.985 | 3.516.242 | 5.183.957 |
| Delegaciones Sur | 149.203 | 245.758 | 454.94 | 1.051.299 |
| Distrito Federal | 3.050.442 | 4.870.876 | 6.874.165 | 8.831.079 |
| Municipios cornubados | 232.572 | 521.993 | 2.001.622 | 5.009.426 |
| Zona Cornubada C.M. | 3.283.014 | 5.392.869 | 8.875.787 | 13.840.505 |
| Municipios Metropolitanos | 208.195 | 253.434 | 353.578 | 546.243 |
| Municipios del Estado de México | 440.768 | 775.427 | 2.355.200 | 5.555.669 |
| TOTAL ZMCM | 3.491.210 | 5.464.303 | 9.299.365 | 14.386.748 |

Fuente: Elaboración propia con los Censo INEGI.

Variables determinantes, causas y consecuencias de las Islas de Calor

La isla de calor urbana es efecto de muchos factores, los cuales pueden ser catalogados como controlables e incontrolables. A su vez estos factores pueden ser clasificados como variables temporales en el tiempo, por ejemplo, la velocidad del viento o la cobertura de las nubes; como variables constantes en el tiempo como lo son las zonas verdes o el material de los edificios; y como variables cíclicas como la radiación solar o las fuentes de calor antropogénico (Sangines, 2013).

Para concentrarlas podríamos decir que existen 5 causas que contribuyen a generar este fenómeno, según Martínez (2014, p. 85):

1. Un mayor almacenamiento del calor durante el día en la ciudad, debido a las propiedades térmicas y caloríficas de los materiales de construcción urbanos y su devolución a la atmósfera durante la noche.
2. La producción de calor antropogénico procedente de las diferentes actividades y procesos de combustión que se llevan a cabo en las áreas urbanas e industriales, como el transporte, la calefacción, alumbrado, etc.

3. La disminución de la evaporación, debido a la sustitución de la superficie natural originaria por un suelo asfaltado o pavimentado, de características diferentes y a la eficacia de los sistemas de drenaje urbanos.

4. Una menor pérdida del calor sensible, debido a la reducción de la velocidad del viento por rozamiento de los flujos aéreos contra las diferentes formas y estructuras de la ciudad, que ofrecen una mayor resistencia a éste, actuando como parapetos.

5. Un aumento de la absorción de radiación solar, debido al efecto de captura que produce la singular geometría que presentan las calles y los edificios y que contribuye, a su vez, a un albedo relativamente bajo.

Estas causas han establecido las bases para numerosos estudios de ICU a lo largo de todo el globo, donde se busca determinar la temperatura de la superficie urbana en varias ciudades mediante diferentes metodologías (Chipre, Italia o Francia) (Moreno, 2016).

Estrategias de mitigación de las Islas de Calor

El clima urbano severo es ocasionado en mayor medida por factores urbanos y en menor medida por las condiciones meteorológicas (Cuadrat et al., 2005). En este sentido diversos estudios han investigado ampliamente las medidas de mitigación del efecto de isla de calor urbana y sus beneficios energéticos, ambientales y económicos (Moreno, 2016; Martínez 2014; Gálvez, 2014; Sangines, 2013).

Las medidas de mitigación del clima urbano se enfocan en proceder mediante tres grupos de actuación:

1. Reducción de las temperaturas superficiales mediante el uso de materiales adecuados al entorno urbano y a la edificación.
2. Incremento de zonas verdes en el entorno urbano.
3. Planeamiento urbano que contemple la mitigación como una prioridad.

Isla de Calor Urbana de Ciudad de México

El fenómeno de la Isla Urbana de Calor tiene que partir de un conocimiento previo del clima, y de los antecedentes de los mismos (Jáuregui, 1995). La Ciudad de México (CDMX), o Distrito Federal como alcanzó a llamarse hasta 2016, es una de las 32 entidades federativas de México, así como la capital de los Estados Unidos Mexicanos. Se localiza en el Valle de México, a unos 19° 25' 42,5" N y 99° 7' 39,6" O (coordenadas GMS) y a una altitud media de 2240 m.s.n.m. La ciudad de México está asentada

en la Cuenca de México, una unidad hidrológica cerrada ubicada en una llanura lacustre. El hecho de ser una cuenca cerrada rodeada de una zona montañosa y en donde existió un sistema de lagos, le da características ambientales especiales, como el clima, el cual es predominantemente templado con una temperatura anual promedio de 15°C y una fuerte temporada de lluvias de mayo a octubre (Jauregui, 1995).

El doctor Ernesto Jáuregui Ostos (1923-2014), fue el responsable de recabar gran parte del conocimiento que se tiene sobre el clima de la Ciudad de México, e incorporar a la jerga de la climatología mexicana términos como isla de calor, confort higrotérmico o bioclima humano (REDMET, 2020). Se parte de la clasificación del clima de CDMX como tropical de montaña atemperado por la altitud, ya que las masas de aire de origen polar barren la cuenca en la estación seca (noviembre-abril) abatiendo aún más las temperaturas (sin llegar a 0°C). Después, al final de la época seca se pueden observar temperaturas aún más altas que raramente sobrepasan los 30°C. Por último, una vez que comienza la temporada húmeda, las mañanas son soleadas y calurosas al mediodía y las tardes frescas y lluviosas. Argumenta que el contraste térmico promedio ciudad-campo a finales del siglo XX era de 1,5°C (Jáuregui, 1993); cuando la capital solo contaba con 16 km² de superficie urbana, mientras que a principios de la década pasada era de unos 9°C (cuando la superficie urbana ya había alcanzado unos 1.000 km²).

La revisión de mapas de isotermas de temperaturas mínimas encontradas en Jáuregui (1995) demuestran que es representativo el mes seco (noviembre) cuando se conjuntan tanto la escasez de humedad del aire como un mayor contraste ciudad-campo en la admitancia de los materiales del sistema urbano. Concluye que esta situación, aunada a cielos nocturnos despejados y aire casi en calma, conduciría a las más intensas islas de calor. Así se puede afirmar que la intensidad de isla de calor guarda relación directa con el tamaño de la ciudad. De modo que, de seguir el crecimiento acelerado de la población de CDMX, continuará intensificándose el contraste térmico ciudad-campo. También comprueba las franjas horarias de acción del efecto, ya que a medida que avanza el día, el calentamiento por el sol de las superficies urbanas, la turbulencia reduce la magnitud del contraste térmico unos 2°-3°C. Por ello, algunas veces el fenómeno queda categorizado como nocturno.

Jauregui, señala que el efecto de la creciente urbanización de CDMX sobre la temperatura es también evidente en la temperatura media del aire de la capital, la cual se elevó de unos 14,5°C a principios de siglo a más de 16°C. Este aumento gradual del aire ciudadano expresado en el paso de un siglo representa un orden de 1,7°C/90 años o 1,89°C/100 años. Ante la notoriedad de los resultados llega a compararlo con el calentamiento a escala hemisférica (1995) debido al efecto invernadero (de 0,56°C/100 años) resultando ser 3-4 veces mayor que en el año de estudio (Carvajal, 2000).

METODOLOGÍA

Debido a la inexistencia de un método claro para el estudio espacio temporal de la ICU en el contexto señalado, el método para su visualización propuesto consiste de los siguientes cuatro pasos: obtención del registro de los datos climáticos, criterios de selección de los datos climáticos, tratamiento de los datos y elaboración de los mapas.

La obtención de los registros de datos

Se tomó como base las estaciones meteorológicas cuyos datos están contenidos en una base de datos accesible desde la Web del Gobierno de la Ciudad de México, concretamente en la que hace referencia a la calidad del aire. Se seleccionó la base de datos correspondiente a la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET, 2020), que tiene como objetivo; entre otros, caracterizar las condiciones meteorológicas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Fernández et al., 2016). Este conjunto de datos, después de un proceso de selección y tratamiento, fueron lo que se utilizaron para estudiar el efecto isla de calor, ya que el método de identificación seleccionado para ello es el uso de las estaciones meteorológicas. Este método proporciona datos climáticos (temperatura en este caso), sin cambio de desplazamiento y con series largas, que nos facilita la detección del fenómeno. Como se ha visto con anterioridad en las causas del fenómeno, las temperaturas provocadas por la radiación resultan puntos determinantes en cada una de las 5 causas señaladas, es por ello que se seleccionan como datos de partida en el estudio.

Los criterios de selección de los datos

La base de datos REDMET (2020) tiene registros de parámetros climáticos desde el año 1986 hasta 2020, esto conforma un total de 34 años. Tras aplicar este primer filtro, los años de estudio que resultan seleccionados son: 1988, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011, 2016 y 2019, ocho años.

El segundo filtro para aplicar fue la elección de los meses y los días que van a ser fundamentales en este trabajo. Para ello, como este estudio se basa en la temperatura y con ello en la radiación solar, se seleccionaron las 4 posiciones singulares del Sol a lo largo del año y que marcan el arranque de las estaciones, los llamados solsticios y equinoccios. Al hallarnos en el hemisferio norte, el solsticio de verano tiene lugar el 21 de junio; y el solsticio de invierno, el 21 diciembre. Para el hemisferio norte, el equinoccio de primavera sucede el 20 marzo y el equinoccio de otoño el 22 de septiembre.

El último filtro que se aplicó fue el correspondiente a las horas, siendo uno de los puntos claves a la hora de analizar el efecto, pues se ha demostrado la variación del fenómeno a lo largo del día; ya sea por el

comportamiento de las superficies, las condiciones climatológicas o la propia actividad de la población en el lugar. En un primer momento, se eligieron tres horas del día, siendo estas, las 8:00 de la mañana; la isla de calor posee un menor efecto, incluso puede presentarse la posibilidad de que las zonas urbanas sean más frescas que el entorno, dando lugar a un efecto opuesto, «*isla de frío urbano*», aunque esta depende de la climatología regional. Por oposición, la hora donde se produce el mayor impacto de la isla de calor es generalmente, pocas horas después de la puesta del sol. Es por ello que la segunda hora del día seleccionada fue las 23:00 horas.

Figura 2.
Cuadro resumen de los criterios seleccionados.

| Años | Meses + Días | Horas |
|--------------|---------------|---------|
| 1988 1991 | 20 marzo | 8:00 |
| 1996 2001 | 21 junio | 13:00 |
| 2006 2011 | 22 septiembre | 23:00 |
| 2016 2019 | 21 diciembre | 04:00 h |

Fuente: Elaboración propia.

Al encontrar un máximo y mínimo del efecto, se piensa en establecer un punto intermedio que señale la mitad del día y así comprobar el comportamiento de la ICU. Para ello se establecen las 13:00 horas, debido a que es una de las horas con mayores índices de radiación solar registrados. Por tanto, las 8:00 hrs., las 13:00 hrs. y las 23:00 hrs.; serán las tres horas seleccionadas para realizar el estudio. Sin embargo, tras la lectura de varios casos de estudio; ICU en el área metropolitana de Barcelona o el estudio del clima de Madrid, nombran un importante aumento de las temperaturas y con ello un incremento del efecto, y por ello se decidió incorporar una hora nocturna al estudio, las 04:00 de la madrugada. El resumen de los criterios aparece en la Figura 2.

Tras la obtención de los datos de las bases seleccionadas según los anteriores criterios, estas fueron sometidas a un control de validación en la identificación y eliminación de datos erróneos. Después de reparar algunos errores, se ordenaron los datos para un mejor procesamiento posterior de ellos mediante tablas Excel (Figura 3); donde la primera columna estaba destinada a la fecha concreta ordenada cronológicamente, 20 marzo - 21 junio - 22 septiembre - 21 diciembre; la segunda columna a las horas del día, 8h - 13h - 23h - 04h; por último, las abreviaturas de las estaciones activas en ese momento con sus respectivas cifras de temperatura. La diferencia de tamaño entre unos registros y otros viene dado por el número de estaciones activas en cada momento.

Figura 3.
Estaciones meteorológicas activas 1988-2019.

| Fecha | Hora | TAC | FAC | XAL | MER | PED | CES | PLA |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 20/03/1988 | 4 | 6.0 | 4.5 | 4.7 | 4.0 | 5.8 | 5.2 | 5.6 |
| 20/03/1988 | 8 | 3.9 | 4.0 | 5.0 | 4.6 | 4.6 | 3.4 | 5.1 |
| 20/03/1988 | 13 | 18.0 | 17.5 | 19.1 | 17.5 | 16.4 | 17.7 | 17.3 |
| 20/03/1988 | 23 | 14.4 | 15 | 15.2 | 14.4 | 13.4 | 14.9 | 14.0 |
| 21/06/1988 | 4 | -99 | 14.2 | 14.2 | 13.2 | 13.8 | 13.7 | -99 |
| 21/06/1988 | 8 | -99 | 14.8 | 15.4 | 14.2 | 14.3 | 14.9 | -99 |
| 21/06/1988 | 13 | -99 | 20.6 | 22.2 | 19.1 | 18.3 | 20.9 | -99 |
| 21/06/1988 | 23 | -99 | 15.4 | 15.2 | 14.5 | -99 | 15.6 | -99 |
| 22/06/1988 | 4 | 13.7 | 12.0 | 13.4 | 14.0 | 13.3 | 13.2 | 13.7 |
| 22/06/1988 | 8 | 14.3 | 12.2 | 13.4 | 13.3 | 13.6 | 13.4 | 14.2 |
| 22/06/1988 | 13 | 23.6 | 22.9 | 23.9 | 23.7 | 23.1 | 23.8 | 23.1 |
| 22/06/1988 | 23 | 15 | 15.8 | 16.9 | 16.4 | 15.6 | 15.6 | 15.7 |
| 22/06/1988 | 4 | 9.1 | 7.6 | 9.7 | 10.2 | 8.9 | 9.0 | 9.2 |
| 22/06/1988 | 8 | 7.7 | 5.0 | 7.7 | 8.4 | 7.5 | 6.2 | 7.6 |
| 22/06/1988 | 13 | 20.0 | 19.4 | 20.7 | 19.9 | 18.2 | 20.4 | 19.4 |
| 22/06/1988 | 23 | 13.2 | 11.6 | 12.9 | 14.9 | 12.3 | 12.2 | 12.4 |

Fuente: Elaboración propia con los Censo INEGI.

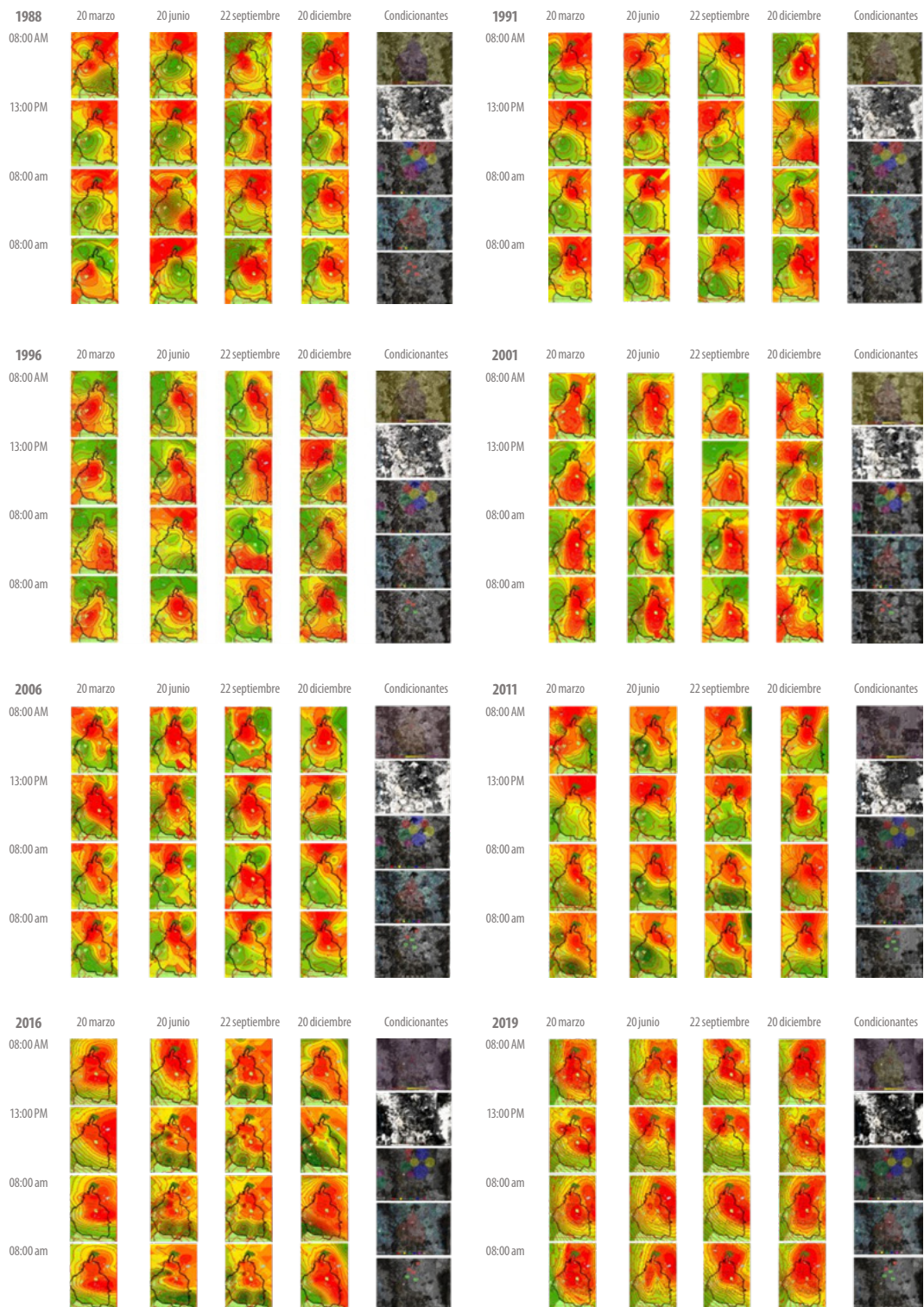
Mientras 1988 registra siete estaciones operativas, 2019 lo hace con 26 estaciones meteorológicas activas, lo que supone una primera diferencia notable y considerable entre el inicio y el final del período estudiado

Seleccionados los datos, se pasa a su tratamiento mediante el software de ArcMap®, mediante el Geostatistical Analyst. La cual permite realizar operaciones de análisis estadístico, partiendo del análisis exploratorio de los datos hasta su representación espacial. Dentro de la caja de herramientas del análisis geoestadístico, la interpolación es un mecanismo capaz de generar nuevos valores en base a unos ya conocidos, y así estimar ciertas temáticas; lo que se ajusta a la situación con los registros de temperaturas. Pero para llevar a cabo esta serie de mapeos el método utilizado es el Kriging (Krige, 1951 en Carvajal, 2000); procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersos con valores z; el valor térmico, este método resulta óptimo para muestras distribuidas espacialmente (Fernández et al., 2004) como es el caso de las estaciones meteorológicas y sus temperaturas. Al tratarse de un método geoestadístico se realiza un examen previo de la variable temperatura y su tendencia de distribución.

La elaboración de los mapas

Tras fijar este plano base que actúa como encuadre del área de trabajo, se debe repetir esta acción por algunos años (8 años, 1988 – 2019), sus correspondientes días singulares (2 solsticios y 2 equinoccios por año) y

Figura 4.
Islas Urbanas de Calor con la dinámica de días y horas del día seleccionadas.



Fuente: Elaboración propia.

dentro de esos días las horas clave que ayudan a vislumbrar el efecto de la Isla de Calor Urbana (8:00 hrs – 13:00 hrs – 23:00 hrs – 04:00 hrs). Para hacer una lectura clara y que arroje conclusiones de estos planos, se opta por crear un matriz comparativa por cada año de estudio, dividido en columnas; que corresponden a los días y en filas, que muestran las horas. Así se facilita tener una lectura tanto horizontal como vertical con el fin de obtener una sencilla interpretación visual del fenómeno.

RESULTADOS

Mapas de la dinámica espacial y temporal de la ICU de Ciudad de México

Según se ha descrito en la metodología de este estudio, se muestra la Isla de Calor Urbana de Ciudad de México, según todas las consideraciones anteriores. Se aportan 8 cuadros, cada uno correspondiente a la fecha del año de trabajo. La última columna corresponde a los condicionantes urbanos que son los encargados de completar el adecuado entendimiento alrededor de los planos que se han generado sobre la ICU (Figura 4). Es por ello que sintetizamos tres parámetros principales y otros dos complementarios que son capaces de considerar los principales cambios del contexto actual.

- Parámetros principales: Población, Huella urbana y Red de transportes.
- Parámetros secundarios: Actividades humanas y Contaminación atmosférica.

Los mismos condicionantes están ligados en el espacio y en el tiempo, y es por ello que resulta clave su comparación de forma simultánea con los propios planos de la Isla de Calor. Observamos como la pauta descontrolada de la población a lo largo de los años, se relaciona directamente con el crecimiento exponencial y de la huella urbana; primero en CDMX y posteriormente extendiéndose al EDO (Estado de México).

Esto viene dado en parte por los cambios en las principales actividades económicas que ocupan a la población activa y su ubicación, ya que CDMX va perdiendo fuerza de atracción a lo largo de los años en decremento del EDO. De la misma manera, los flujos migratorios hacia el interior de la región pierden solidez y aunque la red de transporte se ve mejorada e incrementada, aún resulta insuficiente. En el quinto vértice de este pentágono, encontramos como resultado un aumento notable y alarmante de los niveles de contaminación atmosférica y un desesperado intento de reducirlos mediante numerosos programas de control y alerta.

Así mismo, se destaca la importancia de reflejar los usos del suelo, ya que no todos los usos urbanos condicionan la existencia de la ICU; efectivamente existen unas actividades más negativas que otras, como

el transporte terrestre y aéreo; luego aparecerían las zonas industriales, la actividad terciaria y luego residencial, según su densidad y finalmente las zonas verdes urbanas, verdaderos espacios que amortiguan el microclima local (Higueras y Aram, 2019).

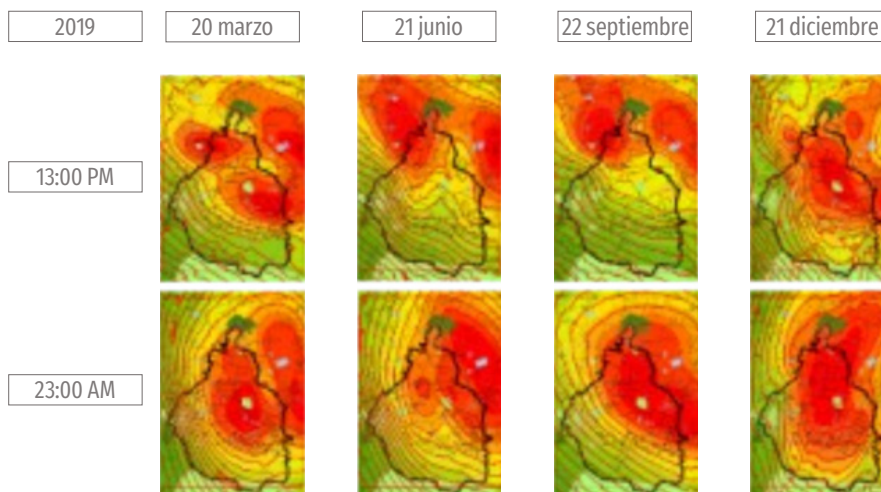
No hay que olvidar la importancia de la base de datos rigurosas para hacer un estudio como este; en este caso la procedencia de las estaciones meteorológicas situadas en la zona de estudio es clave para conocer la dinámica espacial y temporal del fenómeno.

Finalmente se destaca, la importancia de pensar en varias épocas del año, y varias horas del día, para conocer realmente que estamos ante un fenómeno muy variable, dinámico y heterogéneo, que nunca se debe considerar como una foto fija, sino como situaciones continuas de evolución diaria y estacional. Esta información, será necesaria para la adopción de las medidas de planeamiento más efectivas en el tiempo y en el espacio, para la mitigación de los efectos más negativos para la salud de las personas.

ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

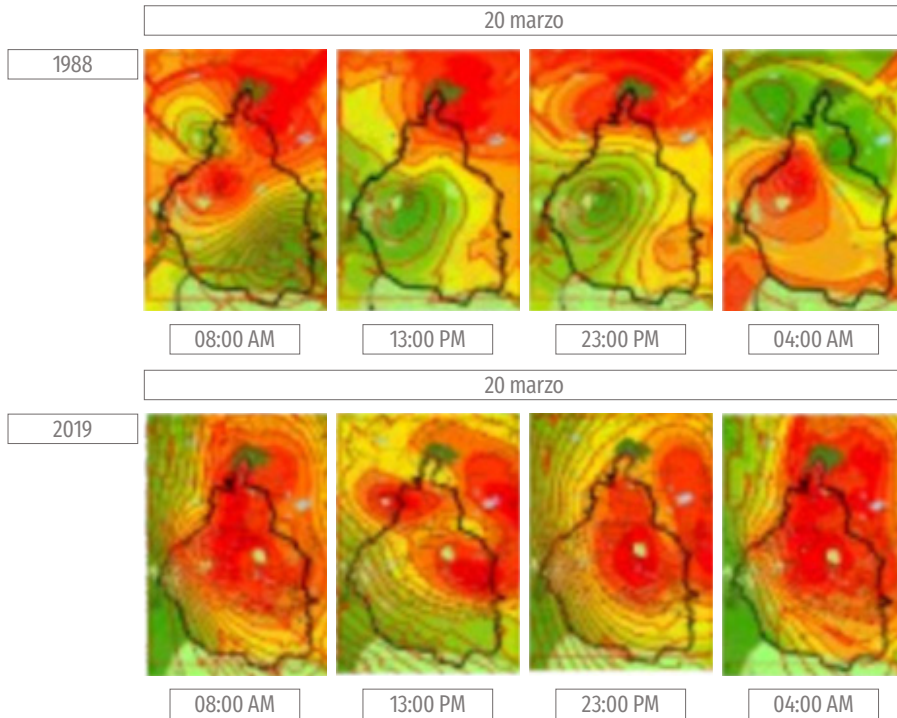
La suma de las numerosas observaciones realizadas tanto en la individualidad de los años, como en la totalidad del fenómeno de ICU de 1988 a 2019, hablan de un proceso con gran dinamismo en las horas; donde se diferencia la ICU nocturna de la ICU diurna. Se ve por ejemplo como las zonas más intensas de calor se desplazan durante el año (Figura 5) y también durante el día (Figura 6).

Figura 5.
Variación configuración Islas Urbana de Calor diurna 13:00 y nocturna 23:00.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.
Comparativa configuración Islas Urbana de Calor de marzo, año 1988 y año 2019.



Fuente: Elaboración propia.

Con la incorporación de nuevas estaciones de registro del área metropolitana, el terreno de la ICU se amplía, los máximos térmicos siguen concentrándose en el centro del territorio; correspondiente al centro de la Ciudad de México, pero año tras año se suma un porcentaje de suelo perteneciente al Estado y que tiene como resultado la variación de la configuración de la ICU, el cual sirve de base para el crecimiento desmesurado de la población, de la huella urbana y consecuentemente de los niveles de contaminación del aire (Figura 6).

Focalizando la exploración de las temperaturas, hay que decir que, aunque las máximas se produzcan durante el día, se concluye que los mayores saltos térmicos ciudad-campo se producen durante la ICU nocturna, fenómeno ya conocido en otras ciudades. La ICU diurna también presente, se caracteriza por contraste de admitancias y mayor captación de radiación solar proveniente de la presencia de construcciones urbanas, ausencia de vegetación y concentración de calor antropogénico, es por esto que el fenómeno se amplifica hacia las zonas conurbadas del Estado, donde el tejido urbano crece y tiene como resultado la disminución de su capacidad de enfriamiento del aire ciudadano.

La consecuencia de dichas tendencias en el progreso anual del fenómeno es la creación de períodos de aumento y otros de descenso de las temperaturas y con ello de las ICU marcado cada 10 años. Los años correspondientes a los descensos han quedado registrados en

1988, 1996, 2006, y 2016, que inmediatamente después darán lugar a los períodos de incremento que son los que corresponden con los años 1991, 2001, 2011 y 2019. Éste último marcado en el estudio como fin se postula como un punto de arranque de un nuevo período de subidas, saltándose así la regla de los 10 años imperante hasta ahora, que será necesario corroborar en estudios posteriores.

Para acabar de analizar la evolución del efecto en estos 31 años de estudio, se calcula el promedio de la temperatura desde 1988 a 2019, que resulta ser 2,2°C más respecto al final del siglo pasado. Esto corresponde a un aumento de 0,07°C/año, cifra que se pone 0,03°C por encima del aumento de la temperatura global respecto a la era preindustrial 0,04°C y 0,02°C si la comparamos con la calculada para el período de 2011-2015, todo ello agudizado por el cambio climático.

Los principales aportes de esta investigación han sido definir y constatar que la Isla de Calor en Ciudad de México es un efecto dinámico y variable, entre las diferentes horas de día, meses del año y años del bloque de estudio. Que se ha producido un claro agravamiento del fenómeno en el periodo temporal estudiado y que evidencia la gravedad del problema plasmado en los planos gráficos y observaciones aportadas con registros de las estaciones meteorológicas. La visualización de la dinámica de la Isla de Calor Urbana servirá de base para tomar múltiples decisiones de proyecto y de planificación urbana en la Ciudad de México (Gobierno del Estado de México, 2021) que ayuden a mitigar de la isla de calor y prevenir sobre sus efectos negativos sobre la salud de las personas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Carvajal, F. (2000). *Estudio de la influencia del microrelieve del suelo sobre el flujo de escorrentía*. Universidad de Almería.

Cervantes, E. (2016). *El desarrollo de la Ciudad de México*. UNAM. México.

Cuadrat, J. & Vicente-Serrano, S. (2008). Características espaciales del clima en La Rioja modelizadas a partir de sistemas de información geográfica y técnicas de regresión espacial. *Zubia*, (20), 119-141.

Cuadrat, J., Serrano, S. & Sánchez, M. (2005). Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): La isla de calor y sus efectos condicionantes. *Boletín de la A.G.E.*, 4(40), 311-327.

Cuadrat, J., Riva, J., López, F. & Martí, A. (1993). El medio ambiente urbano en Zaragoza. Observaciones sobre la isla de calor. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, (13), 127-138.

Fernández, F., Allende, F., Rasilla, A. & Alcaide, J. (2016). *Estudio de detalle del clima urbano de Madrid*. Ayuntamiento de Madrid. UAM.

Fernández, F., Montávez, J.P., González, J. & Valero, F. (2004) *Relación entre la estructura espacial de la isla térmica y la morfología urbana de Madrid*. IV Congreso de la Asociación Española de Climatología. Santander.

Gálvez, J. (2014). *Criterios para la planificación y el diseño de corredores fluviales urbanos para la mitigación de la ICU*. Congreso del Medio Ambiente, 24-27 de noviembre, Madrid.

Gobierno del Estado de México. (2021). *Programa para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México*. https://sma.edomex.gob.mx/mejorar_calidad_aire_zona_metropolitanavallemexico

Hidalgo-García, D. & Arco-Díaz, J. (2022). Análisis de sinergias entre Isla de Calor Urbana y Olas de Calor mediante imágenes Sentinel-3 sobre la ciudad de Granada. *Revista de Teledetección*, (60), 1-15. <https://doi.org/10.4995/raet.2022.17128>

Higueras, E. & Aram, F. (2019). *El Retiro de Madrid, un oasis urbano que actúa como climatizador frente al calor*. The Conversation. <https://theconversation.com/el-retiro-de-madrid-un-oasis-urbano-que-actua-como-climatizador-frente-al-calor-120053>

Jáuregui, E. (1995). Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización. *Revisión y perspectivas*. *Investigaciones Geográficas*, (31), 09-44.

Jáuregui, E. (1993). La isla de calor urbano de la ciudad de México a finales del siglo XIX. *Investigaciones Geográficas*, 1(26). <https://doi.org/10.14350/rig.59016>

Kohlhepp, G. (2004). Reconocimiento científico del viaje de Alexander von Humboldt por los trópicos latinoamericanos (1799-1804) desde una perspectiva geográfica. *Revista Población & Sociedad*, 10-11(1), 41-69.

Martínez, J. (2014). *Estudio de ICU de la ciudad de Alicante, Universidad de Alicante. Procuraduría Ambiental Y Del Ordenamiento Territorial*. El Suelo de conservación del Distrito Federal.

Moreno, M. (2016). El estudio de la ICU en el ámbito mediterráneo: una revisión bibliográfica. *Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*. Barcelona. España.

Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET). (2020). *Base de datos. Gobierno de la Ciudad de México*. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBi%27>

Sangines, D. (2013). *Metodología de evaluación de la ICU y su utilización para identificar problemáticas energéticas y de planificación urbana*. (Tesis Doctoral). Universidad de Zaragoza.

Simioni, D. (2003). *Contaminación atmosférica y conciencia ciudadana*. *Compiladora*. Ediciones CEPAL.