



MODELACIÓN DINÁMICA Y ZONAS CLIMÁTICAS: RELACIONES ENTRE USO Y COBERTURA DEL SUELO BAJO UN ENFOQUE DE MITIGACIÓN. CASO APLICADO EN LA CIUDAD DE TORREÓN, MÉXICO

Jorge Villanueva-Solis^{*1} ORCID_ID: 0000-0002-9778-9225

*Jaime A. Quiroa Herrera*¹ ORCID_ID: 0000-0003-1173-9639

*Alleck J. González Calderón*¹ ORCID_ID: 0000-0001-6850-7594

DOI: <https://doi.org/10.47386/2024V1N4A3>

RESUMEN

La urbanización es considerada un rasgo de modernidad y cambio social, esta ha causado transformaciones en el tejido social, su cultura y patrones de consumo. Las proyecciones indican que la población urbana seguirá creciendo y con ello los desafíos ambientales en las ciudades. En la actualidad la relación entre sociedad y cambio climático es ampliamente debatida en el ámbito académico, las expresiones de esta crisis ambiental y sus dimensiones hoy deben ser encaminadas metodológicamente y con ello ofrecer referentes de los procesos de urbanización a futuro. Sin embargo, son evidentes las limitaciones metodológicas utilizadas en los instrumentos de planeación urbana, motivo por el cual las soluciones técnicas se han vuelto insuficientes al no atender la dimensión del cambio climático. Este trabajo, está orientado a exponer un modelo desarrollado que pretende contribuir en los métodos y procesos de planeación urbana actuales. Por una parte, dando soporte a la toma de decisiones relacionadas con el tema del cambio climático en la ciudad, y por otra, apoyar el planteamiento que reconoce la dinámica urbana como punto de partida para el establecimiento de estrategias frente al cambio climático, en donde, la adaptación debe entenderse como un proceso de aprendizaje y no como un producto de una sola vez.

Palabras clave: Modelación Dinámica; Zonas Climáticas Locales; Mitigación; Planeación Urbana.

¹Escuela de Arquitectura Unidad Torreón. Universidad Autónoma de Coahuila. Ciudad Universitaria, carretera Torreón-Matamoros Km 7.5 Ejido El Águila. Torreón, Coahuila, México. C.P. 27276 Teléfono +52 (871) 720-2083

*Autor por correspondencia jorge.villanueva@uadec.edu.mx

Dynamic modeling and climate zones: relationships between land use and cover under a mitigation approach. Case applied in the city of Torreón, Mexico

DOI: <https://doi.org/10.47386/2024V1N4A3>

ABSTRACT

Urbanization is considered a feature of modernity and social change, this has caused changes in culture, social structure and consumption patterns. Projections indicate that the urban population will continue to grow and with it the environmental challenges in cities. Nowadays the relationship between society and climate change is widely debated in the academic field, the expressions of this environmental crisis and its dimensions today must be methodologically addressed and thus offer references for future urbanization processes. However, the methodological limitations used in urban planning instruments are evident, which is why technical solutions have become insufficient as they do not address the dimension of climate change. This work is aimed at exposing a model, which was developed to contribute to current urban planning methods and processes. On the one hand, supporting decision-making related to the issue of climate change in the city, and on the other, supporting the approach that recognizes urban dynamics as a starting point for the establishment of strategies for climate change, where, adaptation must be understood as a learning process and not as a one-time product.

Keywords: Dynamic Modeling; Local Climate Zones; Mitigation; Urban Planning.

Fechas importantes

Recibido: 6 noviembre 2024 **Aceptado:** 14 diciembre 2024 **Publicado:** 28 diciembre 2024

- Las opiniones vertidas en este artículo son de exclusiva responsabilidad de los autores y no representa el pensamiento ni las opiniones de la revista.
- El presente artículo ha sido dictaminado por pares bajo la modalidad de doble ciego, así como revisado el porcentaje de originalidad por Turnitin con un mínimo de 90%.
- Los manuscritos publicados en esta Revista podrán ser producidos con fines académicos, citando la fuente y el autor.

Introducción

La urbanización ha sido considerada un rasgo de modernidad y un proceso de transición social que ha causado profundas transformaciones en la cultura, la estructura social y los patrones de consumo, dando como resultado una transición en las formas de habitar y con ello una serie de problemas ambientales. Las proyecciones indican que la población urbana seguirá creciendo y con ello los desafíos ambientales, energéticos y alimentarios que enfrentan las nuevas generaciones, problemas directamente vinculados con el espacio y los recursos.

En la actualidad la relación entre sociedad y cambio climático es ampliamente debatida en el ámbito académico. Las expresiones de la crisis ambiental en las ciudades y sus dimensiones hoy deben ser encaminadas metodológicamente y con ello ofrecer referentes a futuro de los procesos de urbanización. Sin embargo, son evidentes las limitaciones metodológicas utilizadas en los instrumentos de planeación urbana, motivo por el cual las soluciones técnicas se han vuelto insuficientes al no atender la dimensión del cambio climático.

Por otra parte, el estudio de los fenómenos urbanos se ha transformado en las últimas décadas, este cambio no es fortuito, se acompaña de los avances en las tecnologías de la información. Lo anterior, aunado a las transformaciones sociales, han hecho que las ideas, conceptos y teorías sobre la ciudad se vuelvan obsoletas y se dé paso a nuevas formas de abordar lo urbano. En este escenario, no sólo el concepto de ciudad ha cambiado, también el quehacer de los urbanistas y planificadores urbanos: la ciudad ha pasado de ser un lugar organizado y regulado para las actividades humanas, para convertirse en un sistema espacial complejo.

En este sentido, Gilman et al., (2007) aborda el tema del cambio climático desde la perspectiva de un sistema complejo y no lineal, que genera inestabilidad dinámica en sistemas humanos y naturales. Agrega, que para responder a esta inestabilidad se requiere de la toma de decisiones, la disponibilidad de recursos y la capacidad de adaptación y flexibilidad instalada en el sistema. La importancia de este enfoque comenta Barton (2009), es que supera los propios enfoques del urbanismo clásico (diseño, zonificación y construcción), los cuales pocas veces se construyen sobre un pensamiento complejo e integrador del sistema y de los flujos que lo dinamizan.

Sin embargo, para el caso de México, Fernández (2012) encuentra serias limitaciones en el tema debido a la inexistencia de suficientes cuadros de profesionales en áreas complementarias del conocimiento para abordarlos; el mismo autor también resalta la necesidad de perfiles profesionales en los temas de modelación climática para desarrollar escenarios futuros de precipitación y temperatura a nivel regional y local, con suficiente resolución espacial y confiabilidad como para ser útiles en el desarrollo de políticas y planes de adaptación y su integración a la planeación territorial y urbana, a través de la cual se elaboren los nuevos planes de desarrollo y de usos del suelo que consideren los impactos climáticos y eviten mayor vulnerabilidad de poblaciones humanas.

Enfoque de sistemas y procesos urbanos

Un sistema, es un grupo complejo de interacciones entre partes interdependientes o componentes. La teoría de sistemas establece precisamente, que esas relaciones interdependientes dan a una organización su carácter. También, que estas relaciones se establecen y mantienen a través de la comunicación, de este modo, en cada división de la estructura habrá también una interdependencia; de tal forma que ninguna parte del sistema

puede permanecer aislada. Por lo tanto, un problema en cualquier parte del sistema afectará eventualmente el todo. Es por lo anterior que la dinámica del sistema es un método invaluable para modelar y simular la naturaleza cambiante y dinámica de los procesos urbanos.

Los sistemas urbanos son complicados de delimitar, sus redes al interior están evolucionando a través del tiempo. Además, los sistemas urbanos son abiertos (los intercambios con su entorno permiten la introducción de innovaciones técnicas o sociales) y se superponen, como una articulación de redes interconectadas. Si las estructuras generales de los sistemas urbanos son complejas, los comportamientos que se pueden observar están lejos de ser completamente estocásticos. A pesar de las desigualdades en el peso y la influencia de los nodos urbanos dentro del sistema, sus trayectorias evolutivas revelan un comportamiento común colectivo. Entre estas características comunes están: adaptación al cambio, selección, cooperación o imitación. Estos comportamientos colectivos contribuyen a garantizar una regulación social del sistema.

Al experimentar con sistemas urbanos, una primera dificultad es definir con precisión cuáles son los objetos en estudio, esto es, identificar claramente el contenido y los límites de cada nivel de organización. De hecho, los objetos urbanos son esencialmente relacionales y se caracterizan por interacciones muy complejas. Una variedad completa de redes que conectan ciudades interfiere en diferentes escalas espaciales y de tiempo, es por ello, que se considera, que los sistemas urbanos se autorregulan, a través de las múltiples interacciones que permiten ajustes sucesivos y adaptaciones progresivas a las perturbaciones externas o a las innovaciones endógenas.

Es por lo anterior, que da Silva et al., (2012) considera que el pensamiento sistémico proporciona un enfoque más holístico en el que las áreas urbanas, se consideran como sistemas complejos que experimentan numerosos intercambios dinámicos en un momento dado, evolucionando constantemente y respondiendo tanto a las interacciones internas como a la influencia de factores externos. Dado que las ciudades son sistemas adaptativos que comprenden varios elementos que, cuando se combinan, tienen cualidades que pueden no estar presentes individualmente. Los cambios son sistémicos y dinámicos, es decir, los cambios en un elemento del sistema pueden inducir cambios en otros elementos. Por lo tanto, el comportamiento de un sistema solo puede entenderse observando todo el sistema y no sus elementos de forma aislada.

Clima y urbanización

El clima urbano se identifica en los denominados climas de capa límite, debido a las características que adquiere la atmósfera sobre las ciudades y su relación directa con la cobertura y usos del suelo. Un fenómeno del clima urbano es el efecto de isla de calor urbana (ICU), una característica del clima en las ciudades que ha sido documentado ampliamente en la literatura, generalmente descrito como la diferencia de temperatura entre la ciudad y sus alrededores rurales. Esta alteración climática en la ciudad fue identificada hace más de dos siglos y continúa su vigencia en la actualidad.

La magnitud de la ICU se cuantifica convencionalmente a través de su intensidad, definida esta como la máxima diferencia entre la temperatura del aire urbana y el entorno rural circundante. Sin embargo, estudios como los de Stewart y Oke (2012); Alexander y Mills (2014) y Unger et al., (2014) hacen referencia que al analizar los datos de estaciones

meteorológicas se identifican dos clases de problemas: por una parte, la interfaz urbano-rural es compleja y el límite siempre es confuso. Por otra, los datos de temperatura del aire obtenidos de distintas estaciones al interior de la ciudad registran diferencias en los valores máximos entre lo urbano y lo rural, esto se debe, a las características termodinámicas distintivas de los materiales utilizados en la superficie urbana, lo cual dificulta comparar los resultados en las ciudades.

Considerando lo anterior, se puede entender que los procesos urbanos que inciden en el clima se vinculan tanto a la forma como a la función de las ciudades. De esta manera, la forma urbana describe aspectos de la cobertura del suelo y su morfología, mientras que la función determina las diversas actividades en la ciudad, ambas están correlacionadas y producen un paisaje urbano heterogéneo. En este sentido, los estudios realizados en las últimas décadas, sobre los impactos del proceso de urbanización en el clima de las ciudades, han permitido el desarrollo de una variedad de modelos de clima urbano, con variaciones en su enfoque y sofisticación matemática, estos modelos, requieren de parámetros de carácter físico del paisaje urbano, para cumplir con sus funciones de simulación del entorno urbano. (Oke, 1982; Arnfield, 2003; Coutts et al., 2008)

Con la finalidad de mejorar la efectividad al medir la magnitud de la ICU y facilitar su comparación en ciudades de todo el mundo, Stewart y Oke (2012) desarrollaron un esquema de clasificación denominado zonas climáticas locales (LCZ por sus siglas en inglés), este, se representa a través de 17 clases basadas en las propiedades de la superficie urbana, estructura, materiales y actividad humana. Cada clase, describe un tipo construido o un tipo de cobertura del suelo. Además, el esquema de clasificación toma en cuenta las propiedades geométricas, de cobertura de superficie, térmicas, radiativas y metabólicas, que hacen que cada tipo de LCZ sea único entre las demás, de tal manera, que la clasificación de LCZ proporciona una fragmentación disjunta y complementaria del paisaje que cubre las principales formas urbanas y los tipos de cobertura del suelo (Stewart y Oke, 2012; Bechtel et al., 2015). Por consiguiente, utilizar la clasificación de zonas climáticas, ofrece la ventaja de analizar la intensificación de la ICU a través de las distintas características del tejido urbano, a diferencia de sólo comparar lo “urbano” con lo “rural”.

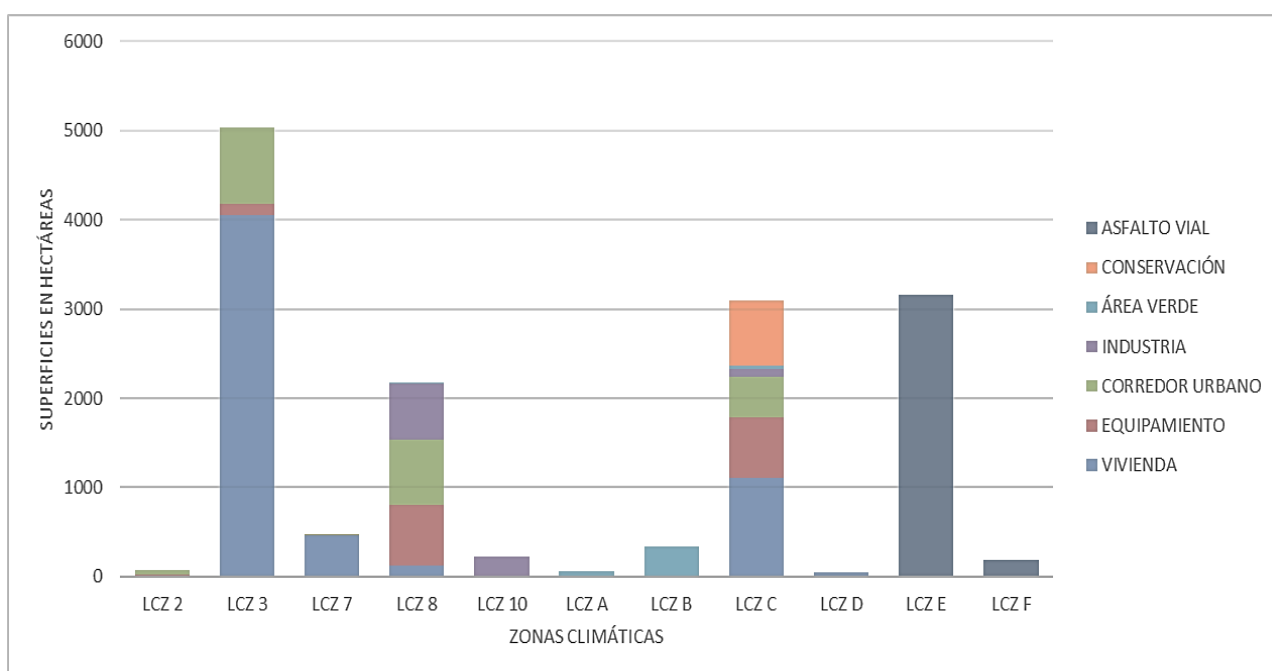
Clima urbano y zonas climáticas en la ciudad de Torreón

El primer antecedente que se tiene sobre el estudio del clima de la ciudad de Torreón y acercamiento a la ICU lo realizó Ernesto Jáuregui en 2006, analizó una base de datos climática del periodo de 1952 a 1998 identificando una tendencia de incremento de temperatura por década de 1.2 °C. Posteriormente el mismo autor en conjunto con otros investigadores, realizan un estudio en el que analizan las condiciones de incremento de temperatura bajo condiciones de isla de calor máxima y cambio climático, resultando para Torreón de 4 °C (Jauregui et al., 2008). Una investigación más sobre el tema es la de Villanueva-Solis (2017), en esta, se utilizó imágenes satelitales para analizar el contraste térmico del tejido urbano con sus alrededores, sus resultados muestran una ICU superficial muy homogénea al referir dos rangos principales de temperatura al interior de la ciudad, el primero oscila entre los 45 y los 50 °C mientras que el segundo entre los 50 a los 55 °C. La distribución y extensión de altas temperaturas de superficie muestra, por una parte, el efecto de la escasa vegetación urbana, y por otra, la consecuencia de un patrón de desarrollo urbano extendido. Posteriormente, el mismo autor utilizando el método de clasificación de zonas climáticas locales, caracteriza el espacio urbano de Torreón con el fin de tener

una base de análisis, a través de cuál sea posible relacionar la intensificación de la ICU con la estructura urbana, su uso del suelo y tipología de edificación, y de esta manera tener la posibilidad de reflejar las alteraciones del clima local en los procesos de planeación del desarrollo urbana.

La caracterización de zonas climáticas de Torreón expone, por una parte, la identificación de once zonas, en las que destacan dado su patrón de distribución y superficie cuatro de ellas: LCZ 3, LCZ 8, LCZ C y LCZ E, las dos primeras de tipo constructivo, las otras dos de tipo cobertura terrestre. Esto es, las primeras hacen referencia a las condiciones constructivas y tipología de edificación, mientras que las de cobertura terrestre refieren sólo las características de cobertura del suelo. Lo anterior destaca, dado que el estudio expone que, sólo considerando las cuatro zonas climáticas se obtiene una representación superior al noventa por ciento de la ciudad, y tomando en cuenta sólo las del tipo constructivo se representa cerca de la mitad del espacio urbano construido. Más aún, el 81% de la LCZ 3 corresponde al uso de suelo habitacional, prácticamente en esta zona climática se tiene caracterizada la situación de la ICU con respecto a la vivienda en la ciudad. En el caso de la LCZ 8 la integran de manera general: 29% uso de suelo industrial, 31% equipamiento y 31% corredor urbano. (Villanueva-Solis, 2020) En la siguiente gráfica se muestra la distribución de las once zonas climáticas en donde se distingue lo arriba mencionado.

Figura 1.- Distribución de uso de suelo por zona climática



Fuente: Adaptación de Villanueva-Solis, 2020.

En el párrafo anterior se acentúan los aspectos relevantes de las zonas climáticas, se hace referencia a la superficie urbanizada y construida de la ciudad. Sin embargo, otro asunto a considerar es el suelo por urbanizar, este se incluye en la LCZ C, en esta zona climática se identifica el suelo disponible para urbanización (vacíos urbanos) que en términos generales representan un poco más de tres mil hectáreas distribuidas en los cuatro principales usos del suelo, donde el destinado a la vivienda representa mayor superficie (véase tabla 1). Lo anterior es de suma importancia, al considerar que las acciones de urbanización futuras deberán integrar estrategias de adaptación climática.

En la gráfica anterior también es posible observar la importancia de la LCZ E, en esta zona climática se identifican todas las superficies pavimentadas, como son: vialidades, estacionamientos y plazas públicas principalmente. Las propiedades térmicas de los pavimentos, en específico el albedo y la emisividad tienen un fuerte impacto en el balance energético de la ciudad y contribuyen de manera significativa a intensificar el efecto de isla de calor urbana, sobre todo, en climas áridos donde las condiciones de cielos despejados son la norma.

En cuanto a las características morfológicas de las zonas climáticas, podemos comentar lo siguiente: la LCZ 3 en general se conforma por manzanas densamente construidas y escasa vegetación, sus edificaciones son compactas de baja altura con azoteas de concreto de poca pendiente. Por su parte, la LCZ 8 se configura a través de edificios de claros amplios, destinados a: la industria manufacturera, el comercio de mayoreo y bodegas de distintos giros. En este tipo de edificaciones predominan los sistemas constructivos metálicos incluyendo sus azoteas, las propiedades termo-físicas de estos materiales, tales como, el reducido retardo térmico y los altos valores de emisividad y reflectancia solar, pueden utilizarse en favor de las estrategias de mitigación. Por último, la LCZ C sus características generales son: suelo con vegetación de tipo matorral xerófilo muy disperso y en algunas partes al oriente de la ciudad se identifican también mezquite dulce (*Prosopis glandulosa*) y huizache (*Acacia farnesiana*).

Tabla 1. Suelo disponible para urbanizar y su uso de suelo que conforman la LCZ C.

LCZ C: USO DE SUELO POR URBANIZAR	SUP (Ha)	%	% DEL TOTAL*
Áreas verdes	36.47	1.2%	0.4%
Industria	83.02	2.7%	0.8%
Vivienda	1109.01	35.8%	10.8%
Equipamiento	674.36	21.8%	6.5%
Corredor urbano	455.75	14.7%	4.4%
Zona de conservación	736.81	23.8%	7.1%
SUPERFICIE TOTAL	3095.42	100.0%	30.0%

Fuente: Adaptada de Villanueva-Solis, 2020.

Considerando lo hasta ahora expuesto, es posible constatar los efectos de la homogeneidad y horizontalidad del tejido urbano, características por las que la intensificación de la ICU es uniforme en los diferentes sectores de la ciudad. A continuación, se definen las estrategias de mitigación y se establecen los criterios a utilizar en el modelo para integrarlas a las zonas climáticas y sus respectivos usos del suelo.

En la literatura se identifican cuatro estrategias principales para mitigar la ICU, estas son: reforestación, azoteas verdes y azoteas frescas, así como pavimentos frescos. Excepto la primera, que hace referencia a incrementar los espacios con vegetación al interior de la ciudad, el resto se orienta a las edificaciones y superficies urbanizadas. Para adoptar estas estrategias como parte de los procesos de desarrollo urbano, es necesario evaluar sus posibilidades de aplicación en el tejido urbano, para ello, la clasificación de zonas climáticas

y aspectos como el uso y cobertura del suelo ofrecen las referencias necesarias para un análisis prospectivo.

En este sentido, la investigación de Olivares (2018) ofrece información de utilidad sobre las características de cobertura de suelo en la ciudad de Torreón, en este trabajo, orientado al análisis de estrategias de infraestructura verde, se caracteriza la cobertura del suelo urbano bajo tres aspectos principales: i) Desplante de edificaciones; ii) Áreas verdes y suelo permeable; y iii) Espacios abiertos con algún tipo de pavimento. Utilizar esta caracterización aporta elementos para establecer las posibilidades de aplicación de las estrategias de mitigación ante la ICU por uso de suelo y su vinculación a las zonas climáticas. Más adelante, en el desarrollo del modelo se define su integración, por ahora, en la siguiente tabla se muestra la relación que guarda cada aspecto con el uso de suelo, en ella se puede observar las proporciones promedio encontradas en la caracterización de áreas verdes (AV) en comparación con el espacio abierto pavimentado (EA), o bien con la superficie de desplante de las edificaciones (AD).

Tabla 2. Relación promedio entre las características de cobertura y uso del suelo.

USO DE SUELO	AV	AD	EA
Corredor Urbano	10.0%	50.5%	39.5%
Vivienda	7.6%	56.2%	36.2%
Industrial	16.0%	41.0%	43.0%
Equipamiento	6.1%	45.4%	48.5%

Fuente: Adaptada de Olivares, 2018

Modelación dinámica como herramienta de análisis y evaluación

La modelación dinámica es una herramienta que ha sido utilizada en diferentes disciplinas, entre las que se encuentra el estudio de los procesos urbanos. En general, consiste en tomar un determinado sistema complejo e identificar los elementos que lo definen y cómo se relacionan estos elementos unos con otros. Al respecto, Sánchez-Rodríguez (2009) explica que el proceso dinámico de crecimiento urbano no sólo debe tener en cuenta el ritmo de la construcción del entorno, también, debe considerar su transformación en el tiempo. Más aún, el mismo autor lo sugiere como punto de partida para abordar el tema de cambio climático en zonas urbanas. Por su parte Engelen et al., (2002), comenta que a través de la modelación es posible estimular la reflexión y facilitar el debate sobre el estado futuro del sistema modelado, así como contribuir al entendimiento de la naturaleza y el comportamiento dinámico del mundo real como sistema. En este mismo sentido, Grafakos et al., (2016) refieren que pensar en términos de resiliencia es inevitablemente un pensamiento sistémico y la dinámica de sistemas un aspecto fundamental para estudiar la combinación entre sustentabilidad y resiliencia.

Otros autores como Arnfield (2003) y Rosheidat y Harvey (2010), establecen que los modelos de simulación numéricos resultan útiles para evaluar escenarios de mitigación de cambio climático urbano, y agregan que, el uso de modelos permite evaluar diferentes escenarios posibles con rapidez, convirtiendo a esta herramienta en una de las preferidas en climatología urbana. Como se puede observar, la modelación dinámica es una herramienta de simulación considerada efectiva para analizar el proceso de transformación

y crecimiento del espacio urbano, aspectos en los que se puede incluir la evaluación de estrategias ante cambio climático.

Por otra parte, al considerar que el clima urbano es resultado de la interacción entre las características morfológicas (Montávez et al., 2008), térmicas y antropogénicas de la ciudad. Proceso que, según Grimm et al., (2008) y Hebbert y Jankovic (2013) se presenta en todas las ciudades y es la manifestación más evidente de cómo la urbanización altera el clima. Motivo por el que Oke (2009) considera fundamental conocer el balance de energía de la superficie urbana para comprender la meteorología y climatología de la capa límite de cualquier sitio.

Es en este sentido, estudios como los de Akbari et al., (1999); Akbari y Rose (2001a); Akbari y Rose (2001b); Menberg et al., (2013); Montávez et al., (2000) y Montávez et al., (2008), abordan el problema utilizando el método Monte-Carlo, a través del cual realizan la caracterización de distribución, tipo de superficies y porcentaje en la ciudad, con el fin de estimar su impacto sobre la temperatura de la ciudad. Bajo la misma óptica Jusuf y Wong (2009), proponen en su modelo para predecir la temperatura del aire en Singapur, relacionar la temperatura (mínima, promedio y máxima) de un sitio con un radio de cincuenta metros, con la radiación solar diaria, el porcentaje de superficies pavimentadas, la altura promedio de construcción, la superficie total de muros, de área verde, así como el factor de apertura de cielo y el albedo promedio de superficie. De manera similar Li et al., (2014) calculan la temperatura de superficie, a través de un modelo que promedia sobre la temperatura de superficies impermeables y la temperatura de superficie vegetal.

Por su parte, Cugnon et al., (2019) proponen y evalúan medidas de adaptación sustentadas en modificaciones de albedo y superficies con vegetación en la ciudad de Bruselas, a través del modelado de escenarios de cobertura del suelo, exploran el impacto en el clima de verano en términos de olas de calor y de isla de calor urbana. Otra investigación reciente, es la de Alexander et al., (2016), en esta se examina el impacto del desarrollo urbano a través de diferentes escenarios. Su objetivo es demostrar un enfoque de modelado que utiliza la clasificación de zonas climáticas locales para analizar el impacto que tienen las diferentes formas urbanas y sus estrategias de planeación urbana y diseño.

Lo expuesto hasta ahora muestra, por una parte, la relación entre los procesos urbanos y sus desafíos ante la intensificación de la ICU, y como a través de una visión de sistemas, se puede abordar y modelar escenarios que permitan construir alternativas para la resiliencia climática urbana. A su vez, es posible observar en la clasificación de zonas climáticas, un insumo factible de incorporar a los procesos de planeación urbana y uso del suelo.

Desarrollo del modelo

El modelo se traduce en un instrumento que se apoya en la clasificación de zonas climáticas, para analizar las posibilidades de aplicar estrategias de mitigación ante los efectos de la ICU. Desarrollado a través de modelación dinámica, esta herramienta es una contribución a los métodos y procesos de planeación urbana actuales, dando soporte a la toma de decisiones relacionadas con el crecimiento de las ciudades y el tema del cambio climático urbano.

La base del modelo en principio considera la morfología de las zonas climáticas y su uso del suelo, de esta manera se reconocen las alteraciones al clima urbano relacionadas con

la estructura y dinámica de la ciudad. Posteriormente se toman en cuenta las características de la cobertura del suelo y la tipología de edificación, con ello, se analiza la aplicación de estrategias de mitigación. De esta forma, el modelo debe entenderse como una herramienta de análisis de carácter prospectivo, que permite examinar alternativas para la conformación de políticas públicas aplicables a través de los instrumentos normativos para el desarrollo urbano.

Considerando lo anterior, así como el enfoque de los estudios mencionados previamente, el modelo representa cada zona climática de la siguiente manera:

$$ZCL (UDS * Sad + UDS * Sea + UDS * Sav) \quad (1)$$

Dónde: ZCL es la zona climática local, misma que se compone de: UDS que representa la superficie de cada uso del suelo al interior de la zona climática, y Sad, Sea y Sav que reproduce la fracción de la superficie que caracteriza la cobertura del suelo bajo los siguientes criterios: (ad) área de desplante de la edificación, (ea) espacio abierto pavimentado y (av) que identifica la superficie de área verde y suelo permeable. De esta manera, se considera a la superficie de desplante de la edificación equivalente a la superficie de azotea y, por lo tanto, susceptible de aplicar la estrategia de azotea verde o fresca; por su parte la estrategia de pavimentos frescos se considera en el espacio abierto pavimentado; por último, la estrategia de reforestación se contempla en la superficie de área verde y suelo permeable. Es así, como la ecuación anterior define para cada zona climática las posibilidades de aplicación de estrategias de mitigación y adaptación ante la intensificación de la ICU.

Para la construcción del modelo se utilizó STELLA® con el fin de desarrollar un sistema dinámico complejo bajo los parámetros antes mencionados. El modelo se estructura a través de bloques, en cada uno ellos, se registran las características de uso y cobertura del suelo de cada zona climática, para su configuración, cada bloque de se divide en usos de suelo y estos a su vez en tres tipos de cobertura (véase Figura 2). De esta manera, a través del modelo es posible analizar la relación entre las variables de uso de suelo y sus características de cobertura para cada zona climática, y con ello, simular las posibilidades de aplicar las estrategias de mitigación ante la ICU.

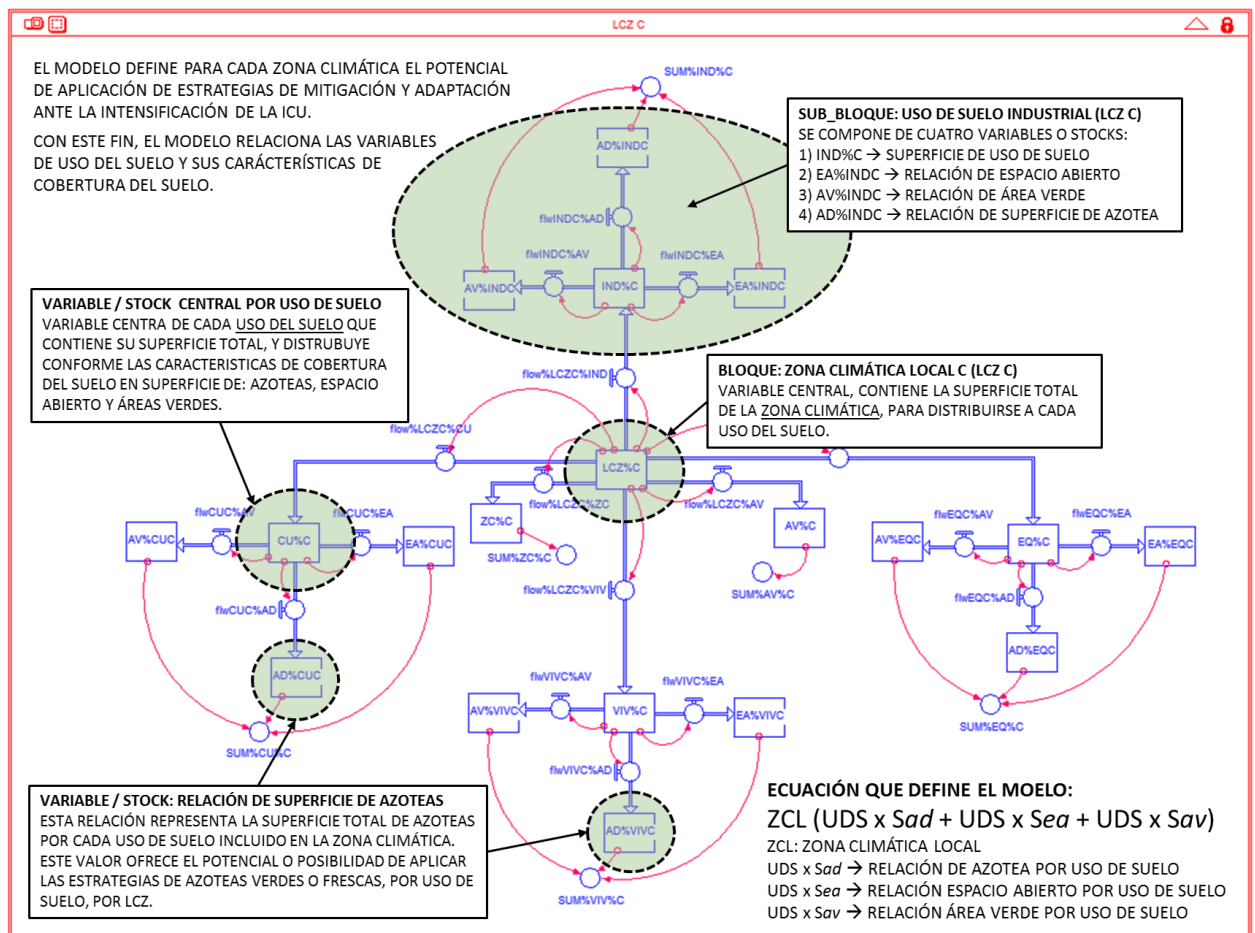
Instrumentación y validación del modelo.

Como primer paso, se evaluó la estructura del modelo a través de sus relaciones causales como supuesto de la dinámica del sistema, esta corresponde principalmente a la definición de las zonas climáticas, sus usos y cobertura del suelo. Al identificar estas relaciones y los ciclos de retroalimentación, se reconocen las interacciones entre cada bloque, asimismo, se demuestra el comportamiento dinámico previsto. De esta manera, es posible determinar que el modelo representa razonablemente tanto la realidad del sistema urbano a través de las zonas climáticas, como el enfoque de mitigación ante los impactos de la ICU.

Posteriormente, con la intención de validar el modelo y confirmar que sus resultados son aplicables en la realidad urbana, se realizaron simulaciones aplicando los datos de zonas climáticas, usos del suelo y, las características de cobertura del suelo descritos

anteriormente. Considerando su utilidad para la revisión de políticas de desarrollo urbano actuales, estas simulaciones fueron orientadas a mostrar el potencial de aplicación de estrategias. A continuación, se muestran los resultados.

Figura 2.- Estructura general de cada bloque del modelo

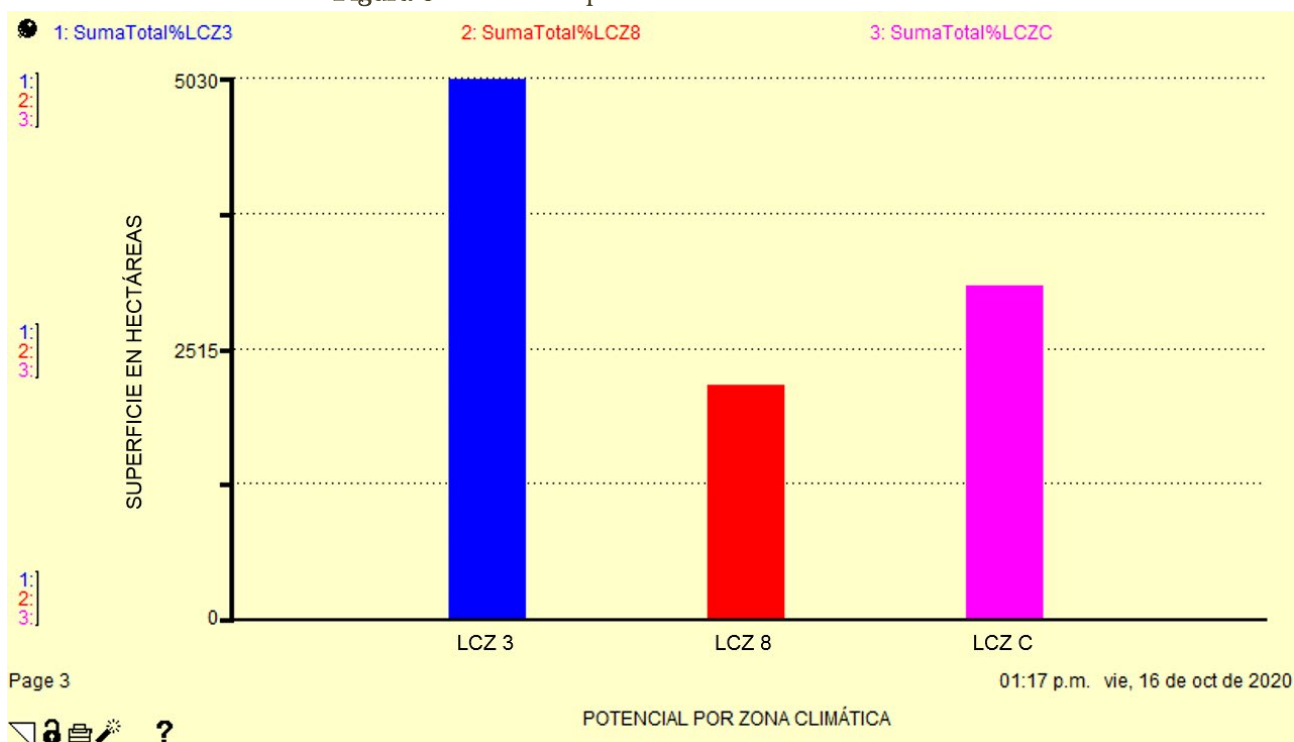


Fuente: Elaboración propia.

La primera simulación considera un enfoque hacia las tres zonas climáticas principales. El potencial que reflejan no es uniforme, destaca la LCZ 3 por su amplia distribución en la ciudad, sin embargo, las posibilidades a futuro que ofrece la LCZ C son de tomarse en cuenta, más aún, al considerar las posibilidades a futuro de esta zona climática, más un proyecto especial para incrementar el albedo en las zonas industriales y comerciales (LCZ 8), se contaría con los beneficios de la mitigación en buena parte de la ciudad. (véase Figura 3).

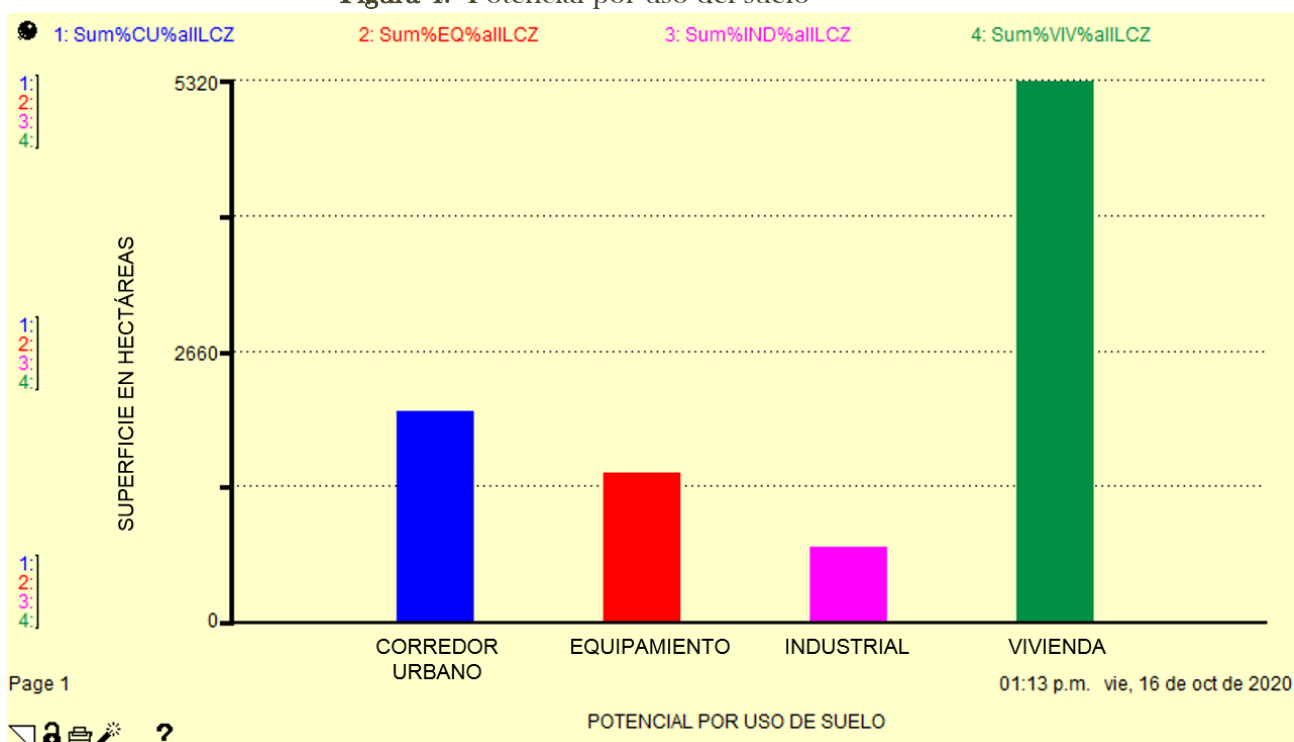
En la segunda simulación el enfoque fue hacia la comparación del potencial por uso del suelo, donde la influencia de la vivienda actual y futura es destacable. Sin embargo, al observar los beneficios que ofrecen el resto de los usos del suelo, se estaría en posibilidades de contar con los beneficios de la mitigación en una fracción importante de la ciudad. (véase Figura 4)

Figura 3.- Potencial por zona climática



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.- Potencial por uso del suelo

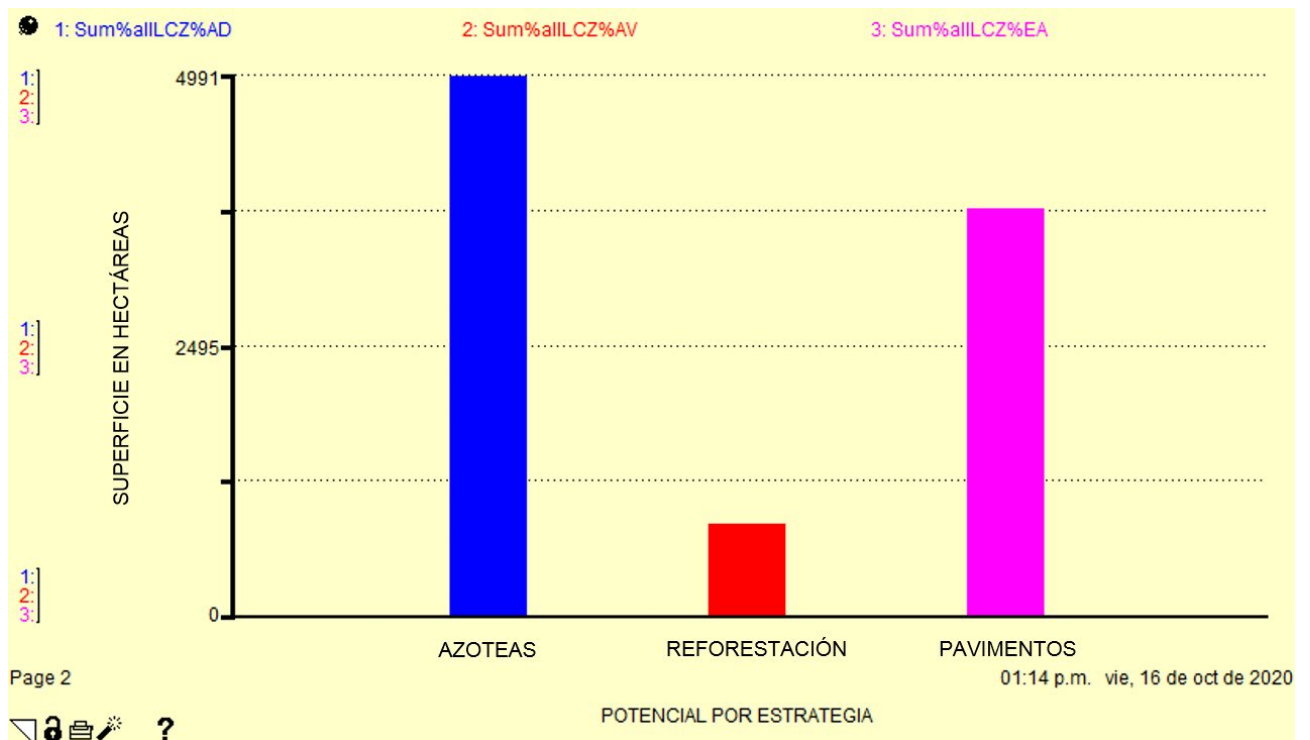


Fuente: Elaboración propia.

Por último, con un enfoque hacia las estrategias de mitigación y utilizando las características de cobertura del suelo, se analizó el potencial que se ofrece por estrategia (véase Figura 5). Considerando que la principal función del suelo urbano es servir de soporte para la

construcción de edificios, la superficie de azoteas destaca sobre las otras dos. Igualmente se identifica la importancia de la superficie de espacio abierto con algún tipo de pavimento. Por el contrario, la cobertura del suelo con características para la reforestación es mínima, y por ello resulta importante resaltar la necesidad de acciones que permitan incrementar las áreas para la reforestación urbana. Bajo estas condiciones, lo más sensato y práctico, es considerar aumentar el albedo en azoteas y pavimentos dada la escasa posibilidad de la reforestación.

Figura 5.- Potencial por estrategia de mitigación



Fuente: Elaboración propia.

Después de instrumentar el modelo y validar su utilidad a través de una serie de simulaciones, se encontró que los resultados expresan en las diferentes escalas y enfoques, las aportaciones de cada estrategia y su contribución con respecto a la situación urbana actual y futura. Con lo anterior, se demuestra la capacidad y desempeño del modelo para emular el comportamiento de la ciudad de forma razonable y útil, así como las aportaciones del método de simulación como una herramienta aplicable a los procesos de planeación urbana con enfoque a la resiliencia climática.

Considerando los resultados del proceso de instrumentación y validación del modelo, es posible argumentar que la simulación permitió plantear el problema complejo de la mitigación de los impactos de la ICU desde el enfoque de zonas climáticas. Validar el modelo comprobó la correspondencia entre el desempeño de las variables utilizadas en la simulación y los aspectos que integran las zonas climáticas, mismas que representan a su vez una realidad urbana. Por lo que resulta factible experimentar con modelos dinámicos

para analizar y comparar escenarios alternativos de desarrollo urbano orientados a mitigar los impactos del clima urbano.

A manera de conclusiones

Definir de forma precisa un sistema complejo como lo es la ciudad, y después conjugarlo con estrategias orientadas a mitigar las alteraciones al clima local, no es tarea sencilla. Desarrollar un modelo que describa este proceso de manera simple, pero cercana a la realidad, permitió aproximarse a este tema. El modelo propuesto se aborda en un contexto de crecimiento urbano, en el cual, se conjugaron variables del desarrollo urbano ligadas al uso del suelo que son utilizadas en los instrumentos de planeación urbana. Es así, que el modelo ofrece cualidades distintivas, que proporcionan una perspectiva sobre la relación entre las acciones para mitigar el cambio climático local y el crecimiento de la ciudad. A diferencia de otros métodos no sustentados en dinámica de sistemas, el modelo desarrollado brinda la capacidad de generar escenarios complejos utilizables en instrumentos de planeación y gestión de suelo urbano.

Por lo tanto, utilizar modelación dinámica como herramienta de análisis, resultó útil para reconocer a través del enfoque de zonas climáticas, las posibilidades de mitigación que ofrece la estructura urbana actual y futura de la ciudad. Más aún, a través de las simulaciones realizadas, se obtuvieron parámetros relacionados con los usos de suelo y tipologías de edificación asociadas, necesarias para la formulación de políticas públicas orientadas hacia el control, mitigación y adaptación al cambio climático en la ciudad. Con ello, se tiene una herramienta que contribuye a reducir las limitaciones técnicas que mencionan Barton (2009) y Fernández (2012).

El trabajo deja de manifiesto que tanto el problema como la solución de los impactos del clima urbano, no están en un modelo de ciudad, sino en el balance e interacción compleja de todos los elementos físicos que la conforman. Esto ratifica la importancia de la morfología, el uso y las actividades en el suelo urbano, pero también, establece la necesidad de incrementar las líneas de investigación sobre el tema.

Por último, el método utilizado ofrece ventajas adicionales, al considerar que este modelo puede ser redimensionado para incluir otros aspectos de la realidad urbana, y con ello, robustecer las relaciones que conforman las zonas climáticas, logrando con ello, aportaciones para un marco de investigación adaptable al tema de la resiliencia climática de las ciudades.

Referencias

Alexander, P.J., Mills, G. Local climate classification and Dublin's urban heat island. *Atmosphere* 5, pp.755-774 (2014).

Alexander P.J., R. Fealy, G.M. Mills. "Simulating the impact of urban development pathways on the local climate: A scenario-based analysis in the greater Dublin region, Ireland". *Landscape and Urban Planning* 152 pp. 72-89
doi:10.1016/j.landurbplan.2016.02.006 (2016).

- Arnfield, J. "Two Decades of Urban Climate Research: A Review of Turbulence, Exchanges of Energy and Water and the Urban Heat Island". *Int. J. of Climatology* 23 pp.1-26 (2003).
- Akbari, H., y L. S. Rose. "Characterizing the Fabric of the Urban Environment: A Case Study of Chicago, Illinois". LBNL-49275, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California (2001a).
- Akbari, H., y L. S. Rose. "Characterizing the Fabric of the Urban Environment: A Case Study of Salt Lake City, Utah". LBNL-47851, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California (2001b).
- Barton R. Jonathan. "Adaptación al cambio climático en la planificación de ciudades-regiones". *Revista de Geografía Norte Grande*, 43 pp. 5-30 DOI:10.4067/S0718-34022009000200001 (2009).
- Bechtel, B., Alexander, P., Böhner, J., Ching, J., Conrad, O., Feddema, J., Mills, G., See, L., Stewart, I. Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 4, pp. 199-219 (2015).
- Cugnion Gwenn, Steven Caluwaerts, François Duchêne, Rafiq Hamdi, Piet Termonia, Sara Top, Thomas Vergauwen, Bert Van Schaebroeck. "Climate Sensitivity to Land Use Changes Over the City of Brussels". *Geographica Pannonica* 23-4 pp. 269-276 DOI:10.5937/gp23-24214 (2019).
- Coutts, Andrew M., Jason Beringer y Nigel J. Tapper. Investigating the climatic impact of urban planning strategies through the use of regional climate modelling: a case study for Melbourne, Australia. *Int. J. Climatol.* 28, pp. 1943-1957 (2008).
- da Silva Jo, Sam Kernaghan y Andrés Luque. "A systems approach to meeting the challenges of urban climate change". *International Journal of Urban Sustainable Development*, 4:2 pp 125-145, DOI: 10.1080/19463138.2012.718279 (2012).
- Engelen, G., R. White, M. Van der Meulen y B. Hahn. "Sustainable Developments of Islands: A Policy Support Framework for the Integrated Assessment of Socio-economic and Environmental Development". In: *Sustainable Development for Island Societies: Taiwan and the World*. H.-H. M. Hsiao, C.-H. Liu and H.-M. Tsai. Taipei, Taiwan, Asia-Pacific Research Program, Academia Sinica and SARCS Secretariat. pp 251-287 (2002).
- Fernández Bremauntz Adrián. "Capacidades institucionales para la gestión del cambio climático: la experiencia de México". Banco Interamericano de Desarrollo. Nota Técnica # IDB-TN-472 (2012). Obtenido en: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Capacidades-institucionales-para-la-gesti%C3%B3n-del-cambio-clim%C3%A1tico-La-experiencia-de-M%C3%A9xico.pdf>
- Gilman, N., Randall, D., & Schwarz, P. "Impacts of climate change: A system vulnerability approach to consider the potential impacts to 2050 of a mid-upper greenhouse gas emissions scenario". San Francisco, CA: Global Business Network. (2007) Obtenido en: https://media.washingtonpost.com/wpsrv/opinions/documents/gbn_impacts_of_climate_change.pdf

- Grafakos Stelios, Alberto Gianoli, Alexandra Tsatsou. "Towards the Development of an Integrated Sustainability and Resilience Benefits Assessment Framework of Urban Green Growth Interventions". *Sustainability* 8, 461 DOI:10.3390/su8050461 (2016).
- Grimm Nancy, Stanley H. Faeth, Nancy E. Golubiewski, Charles L. Redman, Jinguo Wu, Xuemei Bai, John M. Briggs. "Global Change and the Ecology of Cities." *Science* Vol. 319, Issue 5864 pp 756-760 DOI: 10.1126/science.1150195 (2008).
- Hebbert Michael, Vladimir Jankovic. "Cities and Climate Change: The Precedents and Why They Matter". *Urban Studies* 50(7) pp 1332-1347 DOI: 10.1177/0042098013480970 (2013).
- Jáuregui, O. "Posible Impacto de la Urbanización Creciente en el Cambio de Clima Termal de Algunas Ciudades de México". *Memoria del V Congreso de la Asociación Española de Climatología: Clima, Sociedad y Medio Ambiente*. Zaragoza, España. Septiembre (2006).
- Jáuregui, E., Tejada, A. Luyando, Casasola, M y García, G. "Asentamientos humanos: Bioclima, isla de calor y consumo eléctrico". México, INE. (2008) Consultado en: www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2008_ecc_inf_asentamientos.pdf
- Jusuf, S.K. y N.H. Wong. "Development of empirical models for an estate level air temperature prediction in Singapore". *Second International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands*. 21-23 September. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California (2009).
- Li Dan, Elie Bou-Zeid y Michael Oppenheimer. "The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies". *Environ. Res. Lett.* 9 pp 1-16 DOI :10.1088/1748-9326/9/5/055002 (2014)
- Menberg Kathrin, Philipp Blum, Axel Schaffitel y Peter Bayer. "Long term evolution of the urban heat island beneath the city of Karlsruhe, Germany". *Geophysical Research Abstracts* Vol. 15 (2013) EGU2013-6829
- Montávez Juan Pedro; Jesus Fidel González-Rouco y Francisco Valerob. "A simple model for estimating the maximum intensity of nocturnal urban heat island". *Int. J. Climatol.* 28 pp 235-242 DOI :10.1002/joc.1526 (2008)
- Montávez, J.P., Jiménez, J.I. y Sarsa, A. "A Monte Carlo Model of The Nocturnal Surface Temperatures in Urban Canyons". *Boundary-Layer Meteorology* 96. pp 433-452 DOI:10.1023/A:1002600523841 (2000).
- Oke, T.R. "Boundary Layer Climates". 2nd Edition, Routledge, New York (2009).
- Oke, T.R. "The Energetic Basis of the Urban Heat Island". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, pp. 1-24 (1982).
- Olivares Ruiz Hugo I. "Infraestructura verde: Análisis y Evaluación de Estrategias para Mitigar Escorrentías y Encharcamientos en la ciudad de Torreón". Tesis de licenciatura. Escuela de Arquitectura Unidad Torreón. Universidad Autónoma de Coahuila (2018).
- Rosheidat Akram y Bryan Harvey. "Optimizing the Effect of Vegetation for Pedestrian Thermal Comfort and Urban Heat Island Mitigation in a Hot Arid Urban

Environment”. Fourth National Conference of IBPSA-USA New York City, N.Y. August 11 - 13, 2010 pp 230-237 (2010).

Sánchez-Rodríguez Roberto. “Learning to adapt to climate change in urban areas. A review of recent contributions”. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Volume 1, Issue 2. pp 201-206 DOI: 10.1016/j.cosust.2009.10.005 (2009).

Stewart I., Oke T. “Local Climate Zones for urban temperature studies”. *Bull Am Meteorol Soc* 93, 1879 DOI:10.1175/BAMS-D-11-00019.1 (2012).

Unger, J., Lelovics, E., Gál, T. Local Climate Zone mapping using GIS methods in Szeged. *Hungarian Geogr. Bull.* 63 (1), pp. 29-41 (2014).

Villanueva-Solis, J. Análisis para mitigar la isla de calor. *Ciudades* (113), pp. 37-41 ISSN 0187-8611 (2017).

Villanueva-Solis, J. “Zonas Climáticas Locales y Uso de Suelo en Torreón. Vínculos entre ciencia y política para el desarrollo urbano”. Universidad Autónoma de Coahuila. ISBN: 978-607-506-393-5 DOI: 10.13140/RG.2.2.29556.17281 (2020).