



Universidad Autónoma del Estado de México

Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales



EFFECTO DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE EN LA VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE

LAS ISLAS DE CALOR EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA

Tesis

que para obtener el grado de

Maestro en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales

presenta:

Miguel Sánchez Hernández

Comité Tutorial:

Dra. Marlín Pérez Suárez

Dr. José René Valdez Lazalde

Dra. Tizbe Teresa Arteaga Reyes

Toluca, Estado de México

diciembre de 2025

Índice

Introducción.....	5
Marco teórico	7
Ciudades en crecimiento. El paso acelerado de la urbanización global	7
Transformación territorial: El caso dinámico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca .	9
Islas de calor.....	10
La infraestructura verde como aliado climático y social	13
Planteamiento del problema	15
Justificación	16
Objetivos.....	17
Materiales y Métodos	18
Descripción de la zona de estudio.....	18
LST	20
Islas de calor.....	21
Confort térmico urbano	21
Clasificación de coberturas	22
Análisis de correlación	22
Efecto de la infraestructura verde en la LST	23
Resultados	24
Capítulo 1	24
Capítulo 2	25
Discusión general.	26
Conclusiones generales.....	27
Referencias.	28

Introducción

La urbanización es uno de los procesos más significativos en la transformación del territorio a nivel mundial (Soni *et al.*, 2025). Según estimaciones de la Organización de las Naciones Unidas (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2018), se proyecta que para el año 2050, el 68% de la población mundial residirá en zonas urbanas. Este fenómeno, aunque conlleva beneficios como el crecimiento económico, la innovación y el acceso a servicios, también genera una serie de impactos ambientales adversos, entre los cuales destaca la contaminación ambiental, la pérdida de biodiversidad, la deforestación (Soni *et al.*, 2025) y variación de la temperatura superficial tanto a escala local (formación de isla de calor (ICU)), como global (calentamiento global) (Ren *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2019).

El proceso de urbanización implica un cambio en el uso del suelo, donde los sistemas naturales y agrícolas son sustituidos por infraestructura gris. Esto es por superficies impermeables, edificios y vialidades que modifican la estructura térmica y ecológica de las ciudades (Soni *et al.*, 2025). La pérdida de cobertura vegetal, la densificación urbana y el uso intensivo de materiales con alta capacidad de absorción de calor contribuyen a la formación de ICU, que generan un incremento significativo de la temperatura en zonas urbanizadas en comparación con sus alrededores (Ren *et al.*, 2023; Zheng *et al.*, 2024). Este fenómeno, cuya intensidad puede variar a lo largo del día, la noche y las estaciones, tiene implicaciones directas sobre el confort térmico, la salud pública y el consumo energético (Yang *et al.*, 2019). En este contexto, una estrategia ampliamente reconocida para mitigar los efectos de las ICU es el fortalecimiento de la infraestructura verde (Balany *et al.*, 2020). El término de infraestructura urbana engloba una red planificada de áreas naturales y parques, los cuales pueden disminuir la temperatura superficial de un espacio significativamente, en especial con vegetación arbórea (Balany *et al.*, 2020; Yahia *et al.*, 2018). No obstante, la efectividad de estas soluciones depende en gran medida de su disposición espacial, densidad y conectividad ecológica.

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), una de las áreas urbanas de mayor crecimiento en México, ejemplifica claramente las tensiones entre la urbanización acelerada y la infraestructura ambientalmente sostenible. Con más de 2 millones de habitantes distribuidos en 16 municipios, la ZMVT ha experimentado una expansión urbana

desarticulada impulsada por políticas de desarrollo industrial y vivienda de interés social (**Álvarez-Pascual, 2025**). Este modelo de crecimiento ha generado una mancha urbana dispersa, con escasa infraestructura verde y una creciente incidencia de ICU, afectando principalmente a los sectores más vulnerables de la población. Pese a que se han realizado estudios previos sobre ICU en esta región (**Morales-Cervantes, 1994; Morales- Méndez et al., 2007; Romero-Dávila et al., 2011; Rosas-Martínez y Adame-Martínez, 2025**), aún existe una importante brecha de conocimiento respecto a la relación entre la infraestructura verde y la dinámica espaciotemporal de las islas de calor. Evaluar esta relación es crucial para orientar estrategias de planeación urbana sostenible y adaptación al cambio climático, particularmente en contextos como el de la ZMVT, donde la fragmentación del paisaje urbano y la desigualdad socioambiental requiere enfoques diferenciados.

La presente investigación busca evaluar el efecto de la infraestructura verde en la dinámica espaciotemporal de las ICU en la ZMVT, a través del uso de herramientas de percepción remota y análisis espacial., además de determinar el nivel de confort térmico en la zona; estimar la cobertura de la infraestructura verde mediante clasificación supervisada; y delimitar el radio de influencia de esta infraestructura en la regulación térmica. Este trabajo no solo aspira a generar conocimiento técnico y científico sobre las interacciones entre urbanización, vegetación y clima urbano, sino también a proporcionar insumos útiles para la formulación de políticas públicas que promuevan ciudades más habitables, resilientes y equitativas en el contexto de un mundo cada vez más urbanizado.

Marco teórico

A continuación, se describe de manera extensa los antecedentes, definiciones, procesos, causas y consecuencias de fenómenos como la urbanización, las islas de calor urbanas y la infraestructura verde, apoyándose en literatura científica. Se centra en explicar “el qué y el por qué” de los procesos, sus impactos ecológicos, sociales y económicos, y presenta una visión general del conocimiento disponible.

Ciudades en crecimiento. El paso acelerado de la urbanización global

Las zonas urbanas se caracterizan por presentar una explosión demográfica heterogénea, desde hace años se estima que la mitad de la población reside en zonas urbanas y se prevé que para el año 2050 se eleve hasta un 68% (**United Nations, 2018**). Un entorno urbano se puede definir a grandes rasgos por la densidad de población, la concentración de organismos administrativos e infraestructuras, y un conjunto diverso de actividades de subsistencia y generación de ingresos (**Ojiako et al. 2023**). Antes de 1950 la urbanización se produjo principalmente en países desarrollados, ocasionado principalmente por la industrialización en América del Norte y Europa, el ritmo de urbanización en estas regiones ha ido disminuyendo y se estima que en los próximos años el mayor crecimiento de la población urbana se da en zonas como Asia, África y América Latina (**Zhang et al. 2016**). En las últimas cuatro décadas, la población global ha casi duplicado su tamaño, mientras que las zonas urbanas construidas se han incrementado en más del 150% (**Melchiorri et al., 2018; OECD, 2020**). Estos procesos de urbanización provocan cambios en el paisaje y su ecología, generando así la pérdida de coberturas naturales que son sustituidos por superficies impermeables, lo que provoca problemas ambientales como el efecto de isla de calor, contaminación hídrica, atmosférica, acústica y lumínica, además de la introducción de especies (**Tratalos et al. 2007; Grimm et al. 2008**).

Como se mencionó una de las consecuencias directas de la urbanización es la contaminación atmosférica que se genera a partir de las actividades humanas como el consumo de energía derivado de combustibles fósiles, los vehículos, la quema de residuos industriales entre otros, estas actividades provocan más del 70% del dióxido de carbono global (**Omer, 2009; Li et al. 2024**). La contaminación del aire no solo impacta el entorno natural de la Tierra, sino que

también genera costos económicos tanto directos como indirectos, como la disminución de la productividad agrícola, el incremento de los gastos en salud y la baja en la productividad laboral en los centros de trabajo (**Watts, 2015**). Además de esto la escorrentía urbana, cargada de nutrientes y contaminantes provenientes de áreas densamente pobladas, impacta de manera considerable la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos río abajo, lo que frecuentemente provoca eutrofización y pérdida de biodiversidad, por si fuera poco, estas zonas urbanas provocan la sobre explotación de acuíferos locales que pueden conducir al agotamiento de las aguas subterráneas (**Walsh et al. 2005, Zhang et al. 2019**).

Otro aspecto que afecta la urbanización es en términos de los ciclos biogeoquímicos, ya que introduce elementos contaminantes y altera la dinámica de los nutrientes, lo que afecta la salud y calidad de los suelos, además de generar la compactación de los suelos, cambios en la estructura porosa reduciendo así su permeabilidad y la capacidad de intercambio de gases, mermando sus capacidades ecológicas (**Yang et al. 2011; Yu et al. 2024**).

Estos cambios en el suelo son consecuencia del proceso de urbanización, estrechamente relacionado con el cambio en el uso del suelo, el cual se caracteriza por la ampliación de superficies impermeables a expensas de zonas naturales y agrícolas, que son sustituidas por infraestructura urbana, generando un paisaje más complejo tanto a nivel horizontal como vertical, lo que puede llevar a desequilibrios en la estructura del uso del suelo, como la expansión urbana desorganizada y una distribución irracional del mismo, impactando negativamente en el desarrollo sostenible de las ciudades (**Chen & Li, 2021; He et al. 2023; Yu et al. 2024**).

Un factor igual de importante afectado por la urbanización es la biodiversidad ya que los procesos de urbanización a menudo culminan en la degradación de los hábitats naturales, ejemplificada por la deforestación y la transformación de tierras agrícolas en espacios urbanos (**Ren et al. 2022**). Las alteraciones causadas por el ser humano provocan una disminución en las poblaciones de especies, lo que lleva a una reducción de la biodiversidad, asimismo, el proceso de urbanización fragmenta los ecosistemas, restringiendo los patrones migratorios y el intercambio genético entre las especies (**Burt et al. 2019; Yu et al. 2023**).

La urbanización tiene impactos tanto positivos como negativos destacando el lado positivo está el impulso al crecimiento económico, la innovación, la mejora de la infraestructura y la

posibilidad de aliviar la pobreza rural mediante la migración del campo a la ciudad, lo que también mejora el acceso a servicios y empleo (**Chen et al., 2016**). No obstante, estos procesos también presentan desafíos como el agotamiento de recursos, el aumento de la contaminación, la superpoblación, las viviendas inadecuadas y las desigualdades sociales debido a la migración, así como la perturbación de comunidades y usos tradicionales de la tierra por la urbanización, lo que genera inestabilidad social y económica (**Guo et al. 2018; Seto et al. 2012**).

Transformación territorial: El caso dinámico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

Actualmente la ZMVT está constituida por 16 municipios con una población que supera los 2 millones de habitantes, siendo la quinta metrópoli más poblada a nivel nacional (**INEGI, 2020**). Esta zona se caracteriza por su acelerada urbanización producto de las políticas públicas de las últimas décadas, lo que ha provocado una periferia inconexa en términos socio-culturales, ambientales y territoriales (**Jiménez et al. 2016; Díaz & Olivella, 2022**).

El proceso de urbanización de la zona se puede ver claramente desde la década de los setenta, producto del impulso del corredor industrial Toluca-Lerma. Esto generó el establecimiento de zonas industriales, comerciales y de servicios que detonó la inmigración a las zonas cercanas (**García et al. 2015**). Lo anterior originó un proceso de metropolización hacia Lerma debido al cambio de uso de suelo, que pasó de suelo agrícola a uso urbano e industrial, al mismo tiempo el municipio de Metepec incrementó su uso habitacional debido a la demanda de la población migrante (**SEIM, 2010**). Ya en la década de los ochenta la mancha urbana ocupaba alrededor de 1309 ha; y la metrópoli continuó su crecimiento hacia el Municipio de San Mateo Atenco, proceso que se aceleró debido a la llegada de más habitantes a causa del terremoto de 1985, más los efectos migratorios propios del atractivo que la oferta de empleo en el sector secundario daba (**SEIM, 2010**). Durante la década de los noventa la zona metropolitana de Toluca ya estaba consolidada, gracias a la vinculación con el Valle de México y para los 2000 esta zona contaba con más de 1.5 millones de habitantes y una superficie urbanizada de 29, 928 ha. En el periodo 2000-2018, el crecimiento urbano de la zona estuvo asociado a políticas públicas promotoras de conjuntos habitacionales de interés social cada vez más alejados de la ciudad, dejando a su paso una mancha urbana discontinua que se incrementó en 26.90 veces en el periodo 1980-2010 (**Jiménez et al. 2016; Díaz &**

Olivella, 2022). En este contexto, la política habitacional de construcción de vivienda masiva para población de bajo ingreso aplicada en México de 2000 a 2015 tuvo en la periferia norte de la ZMVT un sitio con las características que la distinguieron: suelo barato pero alejado de las zonas de mayor consolidación urbana, provocando un crecimiento desarticulado (**Pedrotti, 2015**).

Islas de calor

La urbanización ha provocado cambios en los entornos naturales debido al rápido crecimiento económico y al aumento de la población, esto contribuye a cambios en el entorno urbano, lo que afecta directamente el ambiente térmico de estas zonas (**Tam et al. 2015**). Los cambios en el entorno térmico de las ciudades originan islas de calor urbanas (Fig.1). Estas islas se caracterizan por un gradiente de temperatura donde las áreas urbanas tienden a tener temperaturas más elevadas que el entorno natural (**Oke, 1982**). Existen varios factores que promueven el aumento de la temperatura urbana, como el albedo de las superficies, la densidad poblacional, la geometría de las ciudades, el porcentaje de infraestructura verde entre otros (**Sangiorgio et al. 2020**).



Figura 1. Efecto de la Isla de Calor Urbana (ICUS) representado mediante un gradiente térmico que muestra el aumento de la temperatura desde las zonas rurales y periféricas (22-26 °C) hacia el centro urbano (30-35 °C). *Figura elaborada por el autor con apoyo de ChatGPT (OpenAI, 2025).*

En el caso particular del albedo en los entornos urbanos se ha reportado que este puede variar dependiendo la geometría de las ciudades (forma, densidad, altura, orientación) incluyendo

también factores como la latitud, clima y cielo visible (**Groleau & Mestayer, 2013**). Para el factor demográfico se ha reportado como la densidad poblacional puede influenciar la formación de islas de calor, ya que una mayor densidad poblacional supone mayor área impermeable y una menor cobertura vegetal, a la vez que aumenta el calor antropogénico debido a los asentamientos densos, reduciendo el flujo de calor latente y aumentando el flujo del calor sensible debido a superficies como carreteras y edificios (**Sidiqui et al. 2022**). De acuerdo con **Jabbar et al. (2023)**, las islas de calor pueden ser islas de calor urbana atmosférica e islas de calor urbana superficial (Tabla1).

Tabla 1. Comparativa térmica: tipos y características de las islas de calor urbanas (**Jabbar et al. 2023**).

Característica	Isla de calor urbana atmosférica	Isla de calor urbana superficial
Variación temporal	Puede ser pequeño durante el día Muy intenso por la noche	Día y noche Muy intenso de día y verano
Intensidad	Poca variación Día (-1 a 3°C) Noche (7 a 12°C)	Mayor variación espacial y temporal Día (10 a 15°C) Noche (5 a 10°C)
Método de estudio	Métodos directos: Estaciones meteorológicas fijas y móviles	Métodos indirectos: Sensores remotos
Representación	Mapas de isotermas, Grafico de temperaturas	Imágenes termales

En las últimas décadas muchos estudios se han centrado en el estudio de las islas de calor utilizando imágenes satelitales a partir del cálculo de la temperatura superficial terrestre (LST), con la cual es posible calcular las islas de calor urbanas superficiales (ICUS). Un factor que contribuye a las islas de calor es el calentamiento de las superficies, debido a los efectos de intercambio de calor provocados por los materiales de construcción, además

también se ven influenciadas por la ubicación geográfica y las condiciones climáticas locales (**Hansen, 2010; Karakus, 2019**).

Es posible realizar un seguimiento temporal y espacial de las ICUS por medio de imágenes satelitales. Waghchaure et al. (2022) reportaron como las ICUS han aumentado su intensidad en la ciudad de Mumbai entre el año 2000 y 2020 donde la temperatura superficial promedio se ha pasado de 27.1 °C a 32.7 °C atribuyendo este aumento al impacto creciente de las actividades humanas. Otro estudio que muestra el aumento en la intensidad de las ICUS a través del tiempo es el reportado por Najafzadeh et al. (2021), quienes evidencian como del año 1989 al año 2019 la ciudad de Teherán ha aumentado en promedio 2.02 °C. El crecimiento urbano en general influye en el desarrollo de las ICUS, se ha reportado como las áreas impermeables, con altas densidad poblacional y con alta actividad económica aumentan las islas de calor (**Molina et al. 2022**).

Además de esto se ha reportado que las islas de calor pueden tener diferencias estacionales. Algunos autores reportan mayores intensidades en verano, además de que estas islas pueden ser más fuertes durante la noche alcanzando intensidades de hasta 2.07 °C (**Yao et al. 2017; Siddiqui et al. 2021; Xin et al. 2022**). Sin embargo, también existen reportes de que las ICUS pueden ser más intensas en invierno, mencionando que el clima regional juega un papel importante en su comportamiento (**Jauregui et al. 1992; Bahi et al. 2016**). Un ejemplo claro son las islas de calor intensas presentes en la CDMX en el mes de noviembre debido a la poca humedad y el contraste ciudad-campo, sumado a cielos nocturnos despejados (**Jauregui, 1995**).

Este fenómeno genera diversas repercusiones en la salud de los habitantes de las zonas urbanas, intensificadas por la expansión de las ciudades y el cambio climático. La exposición prolongada a altas temperaturas puede desencadenar problemas de salud como el agotamiento por calor y los golpes de calor, afectando particularmente a grupos vulnerables como los adultos mayores y quienes padecen enfermedades preexistentes (**Ezpeleta & Roye, 2021; del Toro Pérez, 2023**). En este contexto, se ha identificado que, durante las olas de calor, las islas de calor pueden elevar el riesgo de mortalidad, especialmente cuando las temperaturas nocturnas no disminuyen lo suficiente para permitir la recuperación corporal (**Martín-Vide et al. 2016; Tejedor et al. 2016**). Asimismo, se ha documentado ampliamente

la relación entre las altas temperaturas y la mortalidad, evidenciando que temperaturas superiores a 36 °C están vinculadas con un incremento en los índices de mortalidad (**Tejedor et al., 2016; Royé & Ezpeleta, 2015**).

Además de esto el incremento de la temperatura influye directamente en el confort térmico de los residentes urbanos, impactando tanto su bienestar físico como psicológico. La conexión entre las Islas de Calor Urbanas (ICU) y el confort térmico se evidencia mediante diversos mecanismos, como la alteración de la temperatura del aire, los niveles de humedad y la velocidad del viento, elementos clave en la percepción del confort térmico (**Huang et al. 2020; Zou & Zhang, 2021; Kalogeropoulos et al. 2022**). El confort térmico se ve afectado no solo por el incremento de la temperatura, sino también por la reducción de la humedad relativa y la limitada ventilación, factores frecuentes en áreas urbanas con alta densidad de construcción y poca infraestructura verde (**Aram et al. 2020; Miao et al. 2022**).

En la actualidad la mitigación de las islas de calor se ha convertido en un aspecto prioritario de la planificación urbana. Medidas como la incorporación de infraestructura verde, que incluye la creación de espacios como parques y la plantación de árboles, pueden contribuir a disminuir las temperaturas en las ciudades y mejorar la calidad del aire, lo que repercute positivamente en la salud pública (**Suarez et al. 2020; Mercado & Marincic, 2023; del Toro Pérez, 2023**). Investigaciones han mostrado que incrementar la cobertura vegetal en un 10% podría reducir las temperaturas urbanas hasta en 2.5 °C (**Suarez et al. 2020**).

La infraestructura verde como aliado climático y social

Tomando en cuenta los desafíos que se presentan en los entornos urbanos, una de las estrategias más implementadas para contrarrestar los efectos del cambio climático y las islas de calor son las infraestructuras verdes, estas se pueden definir como una red de áreas naturales y seminaturales planificadas, las cuales pueden proporcionar una serie de beneficios, llamados también servicios ecosistémicos (**EC, 2013**). Una forma común de clasificar la infraestructura verde se basa en sus funciones, que abarcan sistemas productivos, recreativos y ecológicos. La infraestructura verde de tipo productivo, como la agricultura urbana y los huertos comunitarios, contribuye a la seguridad alimentaria y ayuda a mitigar la contaminación del aire y a capturar carbono (**Anderson & Gough, 2021**). Por su parte, la

infraestructura recreativa incluye parques, senderos verdes y bosques urbanos, que ofrecen espacios para el ocio y la interacción social, mejorando la calidad de vida en entornos urbanos (**Simpson & Parker, 2018**). En cuanto a la infraestructura ecológica, esta se enfoca en conservar y restaurar hábitats naturales esenciales para preservar la biodiversidad y garantizar el funcionamiento de los ecosistemas (**Nieuwenhuijsen, 2021**).

Otra perspectiva para clasificar la infraestructura verde considera su disposición espacial, dividiéndola en infraestructuras verdes, azules y grises. Las infraestructuras verdes se refieren a áreas con vegetación, como parques y techos verdes, mientras que las azules incluyen cuerpos de agua y humedales, los cuales gestionan las aguas pluviales y fortalecen los ecosistemas acuáticos (**Syrbe et al. 2021**). En contraste, las infraestructuras grises abarcan sistemas tradicionales de ingeniería, como drenajes y alcantarillado.

Uno de los beneficios más importantes de la infraestructura verde es el amortiguamiento de la temperatura ambiental, lo cual ayuda a mitigar las islas de calor urbanas (**Zuniga-Teran et al. 2020**). Diversos estudios han demostrado que las cubiertas verdes son capaces de reducir considerablemente las temperaturas de las superficies gracias a su efecto de enfriamiento, lo que se traduce en un descenso de las temperaturas ambientales en áreas urbanas (**Anderson & Gough, 2022**). Por ejemplo, la vegetación en techos verdes no solo proporciona sombra, sino que también favorece el enfriamiento por evaporación, disminuyendo eficazmente la temperatura de la superficie del techo durante los meses cálidos de verano (**İokhim & Ekşi 2024**).

La eficacia de la infraestructura verde para regular las temperaturas depende de su disposición espacial y densidad. Investigaciones han encontrado que las zonas urbanas con mayor densidad de espacios verdes presentan temperaturas superficiales más bajas en comparación con áreas con vegetación limitada, además de que la ubicación estratégica de árboles y parques puede facilitar la circulación de aire fresco, ayudando a mitigar la intensidad de las islas de calor urbano en zonas con alta densidad urbana, donde la incorporación de infraestructura verde es esencial para promover la ventilación y reducir la acumulación de calor (**Andersson et al. 2020; Anderson et al. 2022**).

La eficacia de los distintos tipos de infraestructura verde también varía en su capacidad para regular las temperaturas. Por ejemplo, se ha comprobado que los árboles urbanos son más

efectivos para reducir las temperaturas exteriores que los muros o techos verdes, principalmente debido a su amplia copa y capacidad de proporcionar sombra (**Anderson & Gough, 2021**). Esto subraya la importancia de elegir el tipo de infraestructura verde más adecuado para cada contexto urbano con el fin de maximizar sus beneficios de enfriamiento. Asimismo, la integración de infraestructura azul, como cuerpos de agua y superficies permeables, puede potenciar los efectos de enfriamiento al incrementar la humedad y mejorar el confort térmico (**Kurniawan, 2024**). Por otro lado, la implementación de infraestructura verde tiene importantes implicaciones para la salud pública. Al mitigar las temperaturas extremas, la infraestructura verde puede reducir las enfermedades relacionadas con el calor y mejorar la salud respiratoria, especialmente en poblaciones vulnerables (**Anderson et al., 2021**). Estos efectos de enfriamiento contribuyen a crear entornos urbanos más saludables, una necesidad cada vez más relevante frente al incremento de las temperaturas ocasionado por el cambio climático (**Anderson & Gough, 2021**).

Planteamiento del problema

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) ha experimentado un acelerado y desordenado proceso de urbanización que ha transformado radicalmente el suelo, sustituyendo ecosistemas naturales y tierras agrícolas por infraestructura gris. Actualmente, la ZMVT es la quinta metrópoli más poblada de México con más de 2 millones de habitantes. Este crecimiento urbano fragmentado, impulsado por políticas públicas enfocadas en la construcción masiva de vivienda y zonas industriales, ha provocado una reducción significativa de la infraestructura verde y ha intensificado el fenómeno de las Islas de Calor Urbanas (ICU).

Las ICU en la ZMVT generan impactos ambientales y sociales negativos, como el aumento del consumo energético, la alteración de los ciclos hidrológicos y el agravamiento de problemas de salud pública, afectando especialmente a los grupos más vulnerables, como niños y adultos mayores. A pesar del avance en el estudio de las ICU en contextos metropolitanos, en regiones como la ZMVT persiste una brecha significativa de conocimiento sobre cómo estas dinámicas espaciales influyen en la intensidad y distribución

de las ICU. Por ello, resulta fundamental analizar cómo la ubicación, extensión y características de la infraestructura verde pueden contribuir a disminuir la intensidad de las ICU y mejorar el confort térmico de la población local. Este conocimiento es esencial para orientar políticas urbanas que promuevan un desarrollo más sostenible y resiliente frente al calentamiento urbano y así conocer cómo influye la distribución espacial y temporal; así como las características de la infraestructura verde en la mitigación de las islas de calor urbanas y en el confort térmico en la ZMVT.

Justificación

La presente investigación se enmarca en la creciente necesidad de atender los impactos ambientales, sociales y económicos derivados del fenómeno de las islas de calor urbanas en la ZMVT. Esto bajo la expectativa de contribuir al entendimiento de estas interacciones mediante el análisis espaciotemporal del fenómeno y la evaluación del papel regulador de la infraestructura verde. En cuanto a la relevancia práctica y social, el identificar el potencial mitigador de la infraestructura verde puede apoyar el diseño de políticas públicas más efectivas y equitativas en el ámbito urbano-ambiental. Al mismo tiempo, puede contribuir a mejorar la calidad de vida urbana, fortalecer la resiliencia climática y promover la equidad ambiental, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular los relacionados con ciudades sostenibles, salud y acción climática. De esta manera se espera aportar evidencia científica útil para la toma de decisiones urbanas sustentables y generar conocimiento aplicable a contextos urbanos similares, ofreciendo estrategias replicables para enfrentar uno de los desafíos más apremiantes del siglo XXI: la construcción de ciudades más resilientes, saludables y ambientalmente justas.

Objetivos

➤ Objetivo general

Evaluar el efecto de la infraestructura verde en la dinámica espaciotemporal de las islas de calor en la zona metropolitana del valle de Toluca a través de métodos de percepción remota.

➤ Objetivos específicos

- Caracterizar la distribución espacio temporal de las islas de calor en la zona metropolitana del valle de Toluca.
- Determinar el nivel de confort térmico en la ZMVT
- Estimar la cobertura de infraestructura verde en la zona metropolitana del valle de Toluca, a través de una clasificación supervisada.
- Determinar el radio de influencia de la infraestructura verde en la regulación de la temperatura

Materiales y Métodos

Descripción de la zona de estudio

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) (Fig.2) se localiza en el centro del Estado de México, al suroeste del Valle de México. Está compuesta por 16 municipios, entre ellos Toluca, Metepec, Lerma, San Mateo Atenco y Zinacantepec, que en conjunto superan los 2 millones de habitantes, posicionándola como la quinta metrópoli más poblada del país (INEGI, 2020). Su altitud media oscila entre los 2,600 y 2,800 m y presenta un relieve predominantemente plano con áreas colindantes montañosas. El clima de la región es templado subhúmedo con lluvias en verano; las temperaturas medias anuales varían entre 12 y 15 °C, y las precipitaciones oscilan entre los 600 y 1,200 mm anuales. Sin embargo, en zonas densamente urbanizadas se han registrado microclimas asociados al efecto de islas de calor urbana (ICU), con temperaturas superficiales significativamente más altas.

La ZMVT ha atravesado un acelerado proceso de urbanización desde la década de 1970, impulsado por el corredor industrial Toluca-Lerma y por políticas de vivienda social. Este crecimiento ha favorecido una expansión urbana dispersa, caracterizada por el cambio de uso de suelo agrícola y forestal hacia usos habitacionales e industriales. Como resultado, se ha perdido una parte significativa de la cobertura vegetal, lo que ha reducido la presencia de infraestructura verde y exacerbando problemáticas ambientales como el incremento de las ICU y el deterioro del confort térmico urbano.

En este contexto, la infraestructura verde existente –compuesta principalmente por parques, áreas arboladas y cuerpos de agua urbanos, se distribuyen de manera desigual y no siempre responde a criterios de planificación. Esta situación plantea desafíos para la regulación térmica y la provisión de servicios ecosistémicos esenciales, especialmente de alta densidad poblacional. Por sus características urbanas, ecológicas y sociales, la ZMVT representa un caso crítico para el estudio de la relación entre urbanización acelerada, aumento de las temperaturas urbanas y el potencial de mitigación mediante infraestructura verde.

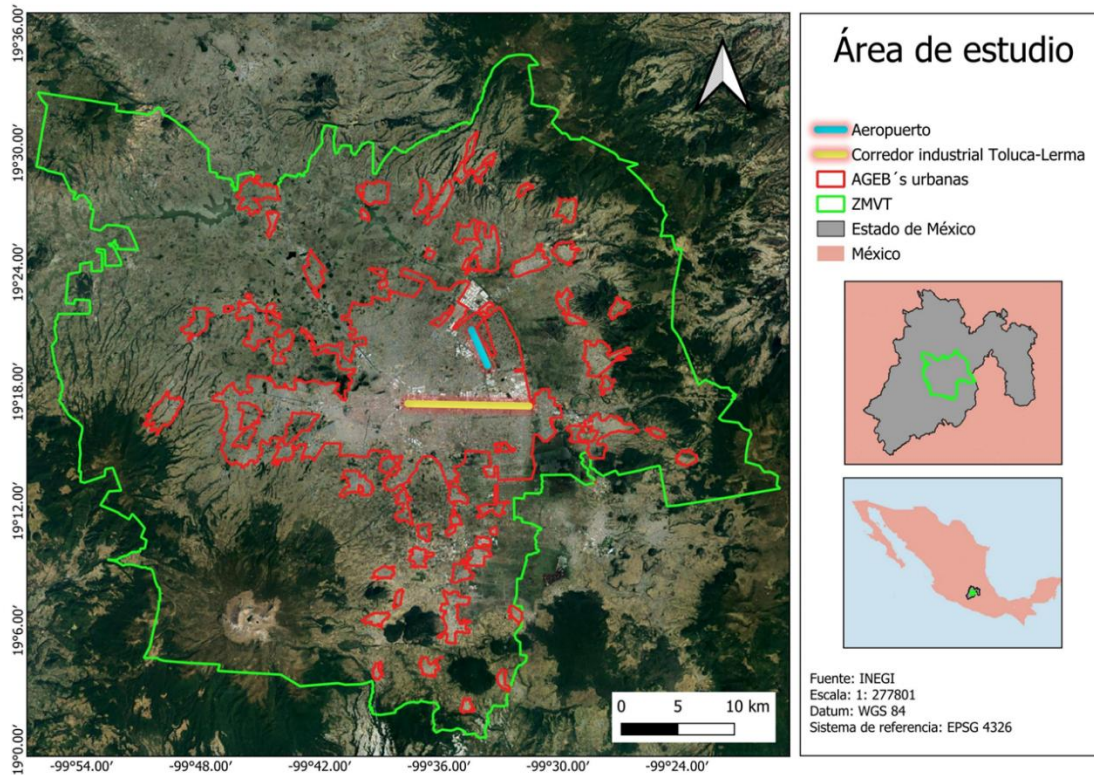


Figura 2. Delimitación de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (verde) y sus AGEBs urbanas (rojo).

Datos del Censo de Población y Vivienda del año 2020 muestran que en la zona existen 622,854 viviendas, siendo el municipio de Toluca el que concentra la mayor cantidad de ellas con 273,955 lo que representa el 44% del total, en segundo lugar, se encuentra el municipio de Metepec con 73,260 viviendas, mientras que Zinacantepec ocupa el tercer lugar con 49,326 viviendas.

Tabla 2. Características Demográficas y Geográficas de los Municipios de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Municipio	Población Total	Viviendas	km ²	Densidad de Población (hab/km ²)
Almoloya de Juárez	98,922	36,622	476.84	207.45
Calimaya	50,482	16,639	102.42	492.89
Chapultepec	10,663	4,569	11.59	927.22
Lerma	122,853	38,487	229.51	535.28
Metepec	234,354	73,260	67.18	3,488.45
Mexicaltzingo	10,854	3,232	11.66	930.87
Ocoyoacac	54,405	14,849	137.96	394.35
Otzolotepec	61,740	17,777	113.86	542.24
Rayón	15,243	4,170	22.87	666.51

San Antonio la Isla	29,933	11,064	25.17	1,189.23
San Mateo Atenco	96,415	26,181	20.87	4,619.79
Temoaya	63,669	20,691	185.23	343.73
Tenango del Valle	73,583	20,470	210.02	350.36
Toluca	869,426	273,955	424.47	2,048.26
Xonacatlán	42,346	11,562	53.27	795.98
Zinacantepec	170,131	49,326	308.71	551.10
Total	2,005,019	622,854	2,401.47	835.23

En la presente tesis se utilizaron imágenes satelitales Landsat 9 Nivel 2 - Colección 2 de primavera, verano, otoño e invierno del año 2023, mediante el uso de la plataforma Google Earth Engine, las cuales cuentan con corrección atmosférica aplicada mediante el algoritmo LaSRC ((Land Surface Reflectance Code) para obtener la reflectancia de la superficie y corrección radiométrica en las bandas térmicas mediante el algoritmo ST (Surface Temperature) para estimar la temperatura de la superficie terrestre (LST) en grados Kelvin. Estas imágenes han sido ortorrectificadas utilizando un modelo digital de elevación (DEM) para mejorar su precisión espacial. También incluyen máscaras de calidad (QA_PIXEL y QA_RADSAT) que permiten identificar nubes, sombras y saturación radiométrica (EEDC,2025).

LST

El cálculo de la temperatura superficial terrestre se llevó a cabo mediante el método propuesto por **Ermida. et al., 2020**. Este método permite una estimación precisa de la LST a partir de datos de Landsat, aprovechando las capacidades de GEE para procesar grandes volúmenes de datos satelitales de manera eficiente y rápida (**Wang et al. 2020; Li, 2024**). El algoritmo SMW (Statistical Mono-Window, SMW) que se utiliza se fundamenta en la relación entre la temperatura de brillo y la LST, considerando la emisividad del suelo como un factor crítico en la precisión de las estimaciones de LST.

La fórmula general del SMW es la siguiente:

$$LST = K2 / \ln\left(\frac{K1}{BT} + 1\right)$$

Donde:

- LST es la temperatura de la superficie terrestre en grados Kelvin.
- BT es la temperatura de brillo obtenida del satélite en grados Kelvin.
- K1 y K2 son los coeficientes de calibración del sensor de Landsat, que dependen del satélite y de la banda utilizada (normalmente para la banda térmica del Landsat K1 = 774.89 y K2 = 1321.08).

- El valor de BT se obtiene a partir de la radiancia de la banda térmica, usando la siguiente fórmula:

$$BT = L\lambda / \varepsilon$$

Donde:

- $L\lambda$ es la radiancia espectral de la banda térmica.
- ε es la emisividad del suelo, que se debe estimar para mejorar la precisión del cálculo de la LST.

Al utilizar el algoritmo propuesto por Ermida et al. (2020) los resultados obtenidos de la LST están expresados en grados Kelvin, por lo que una vez obtenidos se procedió a su conversión a grados centígrados restando 273.15 a la temperatura dada en grados Kelvin.

Islas de calor

Una vez obtenida la temperatura superficial terrestre (LST) se procedió a la identificación y clasificación (Tabla 3) de las islas de calor urbanas superficiales (ICUS). Esto tomando de referencia la media de la LST de la zona urbana y la media de la LST de la zona rural, mediante la siguiente formula (Zhang et al. 2013):

$$ICUS = LST_u - LST_r$$

Donde la LST_u es la temperatura media superficial terrestre de las zonas urbanas y la LST_r es la temperatura media superficial terrestre de la zona rural.

Tabla 3. Categorías de intensidad de islas de calor superficial.

Rango de intensidad °C	Categoría
< 0	Muy baja
0 – 1	Baja
1 – 2	Media
2 - 3	Alta
>3	Muy alta

Confort térmico urbano

A través del índice de varianza del campo térmico urbano se calculó el nivel de confort térmico de la ZMVT. Este índice permite medir la vulnerabilidad e intensidad causada por la isla de calor urbana, dado que está basado en la LST de una zona específica, permitiendo así evaluar el confort térmico en las ciudades (Kafy et al., 2021). A medida que aumenta la LST, se incrementa el impacto de la temperatura ambiental en el confort térmico.

$$UTFVI = \frac{LST_s - LST_m}{LST_m}$$

Donde LST_s es el valor LST y T_m la media de los valores LST respectivamente

Clasificación de coberturas

La clasificación de coberturas en la ZMVT se realizó con imágenes Landsat 9 de 2023 (primavera, verano, otoño e invierno), definiendo seis categorías: urbano, industrial, suelo desnudo, cuerpos de agua, vegetación densa y vegetación ligera. El análisis se efectuó en Google Earth Engine con el algoritmo Random Forest, empleando puntos de control para entrenamiento y validación. La precisión se evaluó con el coeficiente de Kappa. Las bandas espectrales fueron preprocesadas y los datos de entrenamiento se segmentaron para garantizar confiabilidad. Finalmente, se estimó el área de cada categoría a partir de los píxeles clasificados.

Análisis de correlación

Para evaluar la relación entre la LST, ICUS, el confort térmico y las coberturas del suelo en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, se realizó un análisis de correlación de Spearman. Este método se seleccionó debido a que permite analizar relaciones monotónicas entre variables sin asumir una distribución normal de los datos (**Hauke & Kossowski, 2011**).

El coeficiente de correlación de Spearman (ρ) se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde:

- d_i es la diferencia entre los rangos de cada par de observaciones.
- n es el número total de observaciones.

Para el análisis, se organizaron los datos en una matriz de correlación que incluyó las siguientes variables:

- **LST**: temperatura superficial terrestre calculada a partir de las imágenes Landsat 9 mediante el método de Ermida et al. (2020).
- **ICUS**: intensidad de la isla de calor urbano, determinada según la metodología de Zhang et al. (2013).
- **Confort térmico (UTFVI)**: índice de varianza del campo térmico urbano, según Kafy et al. (2021).
- **Coberturas del suelo**: clasificación obtenida mediante el algoritmo Random Forest en Google Earth Engine, considerando las categorías de urbano, industrial, suelo desnudo, cuerpos de agua, vegetación densa y vegetación ligera.

El análisis de correlación permitió identificar patrones de asociación entre las variables y el grado de influencia de las distintas coberturas del suelo en la distribución de la temperatura y el confort térmico en la ZMVT.

Efecto de la infraestructura verde en la LST

Se seleccionaron 10 polígonos de vegetación densa dentro de áreas urbanas y se generaron anillos concéntricos a 30, 60, 90 y 120 m para analizar la variación de la temperatura superficial del suelo (LST) con la distancia a la vegetación. Se calculó la LST promedio en cada zona y se aplicó regresión lineal, junto con pruebas de Kruskal-Wallis y Dunn, para identificar diferencias significativas. El análisis se repitió en primavera, verano, otoño e invierno, evaluando así el efecto de la infraestructura verde sobre la LST en distintas estaciones.

Resultados

Capítulo 1

Variación espacio-temporal de las islas de calor como determinante del confort térmico urbano en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, México.



Variación espacio-temporal de las islas de calor como determinante del confort térmico urbano en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, México

Spatio-temporal variation of the heat islands as a determinant of urban thermal comfort in the Metropolitan Area of Toluca Valley, Mexico

AUTORÍA
Miguel Sánchez-Hernández
Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales,
Universidad Autónoma del Estado de México,
Estado de México, México.

Marín Pérez-Suárez
Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales,
Universidad Autónoma del Estado de México,
Estado de México, México.

José René Valdez Lazalde
Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado
de México, México.

Tizbe Teresa Arteaga-Reyes
Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales,
Universidad Autónoma del Estado de México,
Estado de México, México.

**Jorge Enrique
Ramírez-Albores**
Departamento de Botánica, Universidad
Autónoma Agraria Antonio Nariño, Soledad,
Caucho, México.

DOI
https://doi.org/10.14198/INVESTIGACIONES_GEOGRAFICAS

CITACIÓN
Sánchez-Hernández, M., Pérez-Suárez, M.,
Valdez Lazalde, J. R., Arteaga-Reyes, T. T.,
& Ramírez-Albores, J. E. (2025). Variación
espacio-temporal de las islas de calor como
determinante del confort térmico urbano en
la Zona Metropolitana del Valle de Toluca,
México. *Investigaciones Geográficas: Avances
online publication*. https://doi.org/10.14198/INVESTIGACIONES_GEOGRAFICAS

CORRESPONDENCIA
Marín Pérez-Suárez marin@uaemex.mx

HISTORIA
Recibido: 13 marzo 2025
Aceptado: 19 junio 2025
Publicación anticipada: 15 octubre 2025

TÉRMINOS
© Miguel Sánchez-Hernández, Marín Pérez-
Suárez, José René Valdez Lazalde, Tizbe
Teresa Arteaga-Reyes, Jorge Enrique Ramírez-
Albores
**Este trabajo se publica bajo una
licencia Creative Commons de Atribución.
NoComercial-CompartirAdaptación 3.0 Internacional**

Resumen

Las islas de calor urbanas son un problema importante con diversas consecuencias negativas en las zonas urbanas, generando una disminución en el confort térmico y malestar de los habitantes por el incremento de la temperatura ambiental. Este estudio evaluó la dinámica espacio-temporal de las islas de calor superficiales y el confort térmico urbano en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, México. Se calculó el NDVI y la temperatura superficial terrestre a partir de imágenes Landsat para determinar las islas de calor y el confort térmico urbano. Se observó que existen diferencias en la distribución de las islas de calor a lo largo del año siendo verano y otoño las estaciones más afectadas, principalmente en las áreas más urbanizadas. El confort térmico también muestra variaciones estacionales, donde más del 30% de la superficie evaluada presenta malas condiciones. Las variaciones en la distribución e intensidad de las islas de calor y el confort térmico están influenciadas por los cambios estacionales en la cobertura vegetal, lo cual se evidencia en la correlación negativa observada entre el NDVI y la temperatura superficial terrestre, así como con las islas de calor superficiales. El estudio presenta algunas limitaciones, entre las que se incluyen la baja resolución espacial de las imágenes para capturar detalles finos, su limitada frecuencia temporal, la interferencia de nubes, una capacidad espectral restringida para ciertos análisis y una disponibilidad histórica variable. No obstante, la información generada puede ser de gran ayuda para el diseño de estrategias de planificación territorial que promuevan la sostenibilidad de la zona.

Palabras clave: infraestructura gris; infraestructura verde; Landsat; NDVI; temperatura superficial terrestre; Toluca; urbanización; uso de suelo.

Abstract

Urban heat islands constitute a major problem with various negative consequences in urban areas, resulting in a decrease in thermal comfort and greater discomfort among inhabitants due to the increase in ambient temperature. This study evaluates the spatiotemporal dynamics of surface heat islands and urban thermal comfort in the Metropolitan Area of the Toluca Valley, Mexico. NDVI and land surface temperature have been calculated using Landsat images to determine heat islands

Capítulo 2

Efecto de enfriamiento de la infraestructura verde sobre la superficie terrestre en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Efecto de enfriamiento de la infraestructura verde sobre la superficie terrestre en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Resumen

La infraestructura verde (IG) se ha posicionado como una estrategia clave para mitigar las islas de calor urbanas en zonas metropolitanas donde la cobertura vegetal es cada vez más reducida generando retos importantes para la sostenibilidad de las ciudades y el bienestar de sus habitantes. El objetivo de este trabajo fue analizar el papel de la IG en la regulación de la temperatura superficial terrestre (LST) en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT). Se identificaron las principales coberturas del suelo en cuatro estaciones del año, incluyendo vegetación densa, vegetación ligera, áreas urbanas, industriales, suelo desnudo y cuerpos de agua a partir de imágenes Landsat 9 y mediante clasificación supervisada con el algoritmo Random Forest. Los resultados evidenciaron una marcada estacionalidad: en primavera e invierno predominaron las superficies urbanas y de suelo desnudo, asociadas a temperaturas más elevadas; mientras que en verano y otoño la expansión de la vegetación agrícola contribuyó a reducir la LST en las zonas rurales. La vegetación densa, aunque limitada en extensión, se concentró principalmente en parques y áreas naturales, lo que confirmó su papel clave como regulador térmico. El análisis de gradientes térmicos en torno a estos parches de vegetación mostró un patrón consistente, en el cual la LST aumentó progresivamente conforme se incrementaba la distancia a las áreas verdes, con diferencias superiores a 3 °C en primavera y otoño. Asimismo, los análisis estadísticos (modelos lineales, pruebas de Kruskal-Wallis y comparaciones post-hoc) corroboraron la influencia significativa de la vegetación hasta un radio cercano a 30 metros, aunque dicho efecto se redujo durante otoño e invierno. En conjunto, los hallazgos refuerzan el papel de la IG como mecanismo eficaz para mitigar las islas de calor urbanas y mejorar el confort térmico. Asimismo, subrayan la necesidad de ampliar y distribuir equitativamente estos espacios en la ZMVT, posicionándolos como estrategia clave frente a los retos que plantean el cambio climático, la urbanización acelerada y sus implicaciones en la salud y la sostenibilidad urbana.

Discusión general.

Este trabajo permitió comprender de manera clara cómo la infraestructura verde influye en la dinámica térmica de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Se observó que la variación estacional de la temperatura superficial está estrechamente relacionada con los cambios en la cobertura vegetal: las zonas con más vegetación tienden a mantenerse frescas, mientras que las áreas dominadas por infraestructura gris acumulan y retienen calor.

Un aspecto relevante fue la identificación de islas de calor no solo en zonas urbanas, sino también en áreas agrícolas durante los periodos secos, lo que demuestra que la ausencia de vegetación puede generar altos niveles térmicos incluso fuera de la ciudad. Esto amplía la comprensión tradicional del fenómeno y subraya la necesidad de incorporar estrategias de manejo vegetal tanto en entornos urbanos como rurales.

Los resultados también dejan ver una desigualdad ambiental en la distribución de la infraestructura verde. Las áreas más densamente urbanizadas concentran las peores condiciones de confort térmico, lo que representa un riesgo para la salud y la calidad de vida de sus habitantes. En este contexto, la vegetación actúa como un elemento clave para mitigar los efectos del calor, reducir la temperatura superficial y mejorar las condiciones ambientales.

La relación negativa entre el NDVI y la temperatura superficial confirma el papel regulador de la vegetación, y el análisis de gradientes térmicos mostró que el efecto de enfriamiento puede extenderse hasta unos 30 metros alrededor de las áreas verdes más densas. Este resultado ofrece una referencia útil para la planeación urbana, ya que demuestra que no solo la cantidad, sino también la ubicación y conectividad de los espacios verdes determinan su eficacia.

En conjunto, los hallazgos reafirman que una planeación urbana basada en la integración de infraestructura verde puede mejorar el confort térmico, reducir los efectos de las islas de calor y contribuir al bienestar ambiental de la ZMVT

Conclusiones generales

A partir del desarrollo de esta investigación, se pueden establecer las siguientes conclusiones generales:

Caracterización de las Islas de Calor: Se confirmó la presencia de islas de calor superficial en la ZMVT con una marcada variabilidad estacional. El fenómeno se manifiesta con máxima intensidad en el corredor industrial y zonas densamente construidas durante el verano.

Evaluación del Confort Térmico: El confort térmico en la ZMVT es predominantemente desfavorable. Más del 30% de su superficie presenta condiciones térmicas clasificadas como "pésimas" durante todo el año, coincidiendo espacialmente con las áreas de mayor urbanización y menor densidad de vegetación, lo que representa un riesgo significativo para la salud y el bienestar de la población.

Papel de la Infraestructura Verde: La infraestructura verde se confirma como un factor crítico en la mitigación del calor urbano. Existe una relación inversa y estadísticamente significativa entre el NDVI y la temperatura superficial, demostrando la capacidad de la vegetación para regular el microclima a través de la evapotranspiración y el sombreado.

Radio de Influencia Cuantificado: Una de las contribuciones clave de este trabajo es la cuantificación del radio de influencia de la infraestructura verde. Se determinó que los parches de vegetación densa ejercen un efecto de enfriamiento significativo hasta en un radio de 30 metros, pudiendo reducir la temperatura superficial en más de 3°C en su entorno inmediato. Este hallazgo provee un insumo valioso y concreto para el diseño de políticas de planeación urbana.

Referencias.

- Álvarez Pascual, N. (2025, 4 de marzo). Urge actualización de planes de desarrollo urbano ante crecimiento desordenado. El Sol de Toluca. Disponible en: <https://oem.com.mx/elsoldetoluca/local/urge-actualizacion-de-planes-de-desarrollo-urbano-ante-crecimiento-desordenado-21988769>
- Anderson, V. and Gough, W. (2021). Nature-based cooling potential: a multi-type green infrastructure evaluation in toronto, ontario, canada. *International Journal of Biometeorology*, 66(2), 397-410. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02100-5>
- Anderson, V. and Gough, W. (2021). Nature-based cooling potential: a multi-type green infrastructure evaluation in toronto, ontario, canada. *International Journal of Biometeorology*, 66(2), 397-410. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02100-5>
- Anderson, V., Gough, W. A., Zgela, M., Milosevic, D., & Dunjic, J. (2022). Lowering the temperature to increase heat equity: a multi-scale evaluation of nature-based solutions in Toronto, Ontario, Canada. *Atmosphere*, 13(7), 1027.
- Anderson, V., Gough, W., & Agic, B. (2021). Nature-based equity: an assessment of the public health impacts of green infrastructure in ontario canada. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(11), 5763. <https://doi.org/10.3390/ijerph18115763>
- Andersson, E., Haase, D., Scheuer, S., & Wellmann, T. (2020). Neighbourhood character affects the spatial extent and magnitude of the functional footprint of urban green infrastructure. *Landscape Ecology*, 35, 1605-1618.
- Aram, F., Solgi, E., García, E. H., & Mosavi, A. (2020). The impact of the cooling effect of urban parks on thermal comfort from the physiological and the psychological perspective.. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-36115/v1>
- Bahi, H., Rhinane, H., Bensalmia, A., Fehrenbach, U., & Scherer, D. (2016). Effects of urbanization and seasonal cycle on the surface urban heat island patterns in the coastal growing cities: A case study of Casablanca, Morocco. *Remote Sensing*, 8(10), 829.
- Balany, F., Ng., A., Ng, A.W.M., Muttill, N., Muthukumaran, S., Wong, M.S. 2020. Green infrastructure as an urban heat island mitigation strategy – A review. *Water*, 12(12): 3577; <https://doi.org/10.3390/w12123577>

- Burt, J. A., Killilea, M. E., & Ciprut, S. (2019). Coastal urbanization and environmental change: Opportunities for collaborative education across a global network university. *Regional Studies in Marine Science*, 26, 100501.
- Chen, M., Liu, W., & Lu, D. (2016). Challenges and the way forward in China's new-type urbanization. *Land use policy*, 55, 334-339.
- Chen, W., Zeng, J., & Li, N. (2021). Change in land-use structure due to urbanisation in China. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128986.
- Del Toro Pérez, A. F., Julio Galvis, L. L., Payares Ramos, P. L., & Villadiego Martinez, H. A. (2023). Islas de calor urbano en el municipio de santa cruz de lorica, colombia, entre los años 2001, 2007 y 2021, caso de aplicación con imágenes satelitales aster. *Revista Environment & Technology*, 4(1), 87-101. <https://doi.org/10.56205/ret.4-1.5>
- Díaz, E. S., & Olivella, R. E. (2022). El habitar e identidad étnica en la periferia urbana (Zona Metropolitana de Toluca, México). *PatryTer*, 5(9), 125-141.
- Earth Engine Data Catalog (E.E.D.C.) (s.f.). Landsat 9 Collection 2 Tier 1 Level-2. Google Earth Engine. Recuperado el 28-01-2025, de https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC09_C02_T1_L2
- Ermida, S. L., Soares, P., Mantas, V., Göttsche, F. M., & Trigo, I. F. (2020). Google earth engine open-source code for land surface temperature estimation from the landsat series. *Remote Sensing*, 12(9), 1471.
- European Commission (EC). (2013). Green Infrastructure (GI) — Enhancing Europe's Natural Capital. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Ezpeleta, A. M. & Royé, D. (2021). Intensidad y duración del estrés térmico en verano en el área urbana de madrid. *Geographicalia*, (73), 95-113.
- García-González, M. D., Adame-Martínez, S., & Sánchez-Nájera, R. M. (2015). Expansión metropolitana de Toluca: caso de estudio municipio de Calimaya. México. Quivera. Recuperado el, 2.
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *science*, 319(5864), 756-760.
- Groleau, D. & Mestayer, P.G. Urban Morphology Influence on Urban Albedo: A Revisit with the SOLENE Model. *Bound.-Lay. Meteorol.* 2013, 147, 301–327.

Guo, Y., Zhu, J., & Liu, X. (2018). Implication of rural urbanization with place-based entitlement for social inequality in China. *Cities*, 82, 77-85.

Hansen, H. S. (2010). Modelling the future coastal zone urban development as implied by the IPCC SRES and assessing the impact from sea level rise. *Landscape and Urban Planning*, 98(3-4), 141-149.

Hauke, J., & Kossowski, T. (2011). Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data. *Quaestiones geographicae*, 30(2), 87-93.

He, Q., Yan, M., Zheng, L., & Wang, B. (2023). Spatial stratified heterogeneity and driving mechanism of urban development level in China under different urban growth patterns with optimal parameter-based geographic detector model mining. *Computers, Environment and Urban Systems*, 105, 102023.

Huang, C., Tsai, H., & Chen, H. (2020). Influence of weather factors on thermal comfort in subtropical urban environments. *Sustainability*, 12(5), 2001. <https://doi.org/10.3390/su12052001>

INEGI. (7 de julio de 2023). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica.

İokhim, P., & Ekşi, M. (2024). Thermal regulation capacity of a green roof in the Mediterranean climate of Istanbul. *Building Services Engineering Research & Technology*, 45(2), 185-201.

Jabbar, H.K., Hamoodi, M.N., & Al-hameedawi, A.N. (2023). Urban heat islands: a review of contributing factors, effects and data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1129.

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), 09-44.

Jauregui, E., Godinez, L., & Cruz, F. (1992). Aspects of heat-island development in Guadalajara, Mexico. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 26(3), 391-396.

Jiménez Sánchez, P. L., CALDERON MAYA, J. R., & CAMPOS ALANIS, H. E. C. T. O. R. (2016). Fragmentación y desarrollo habitacional en la Zona Metropolitana de Toluca.

Kafy, A. A., Rahman, M. S., Islam, M., Al Rakib, A., Islam, M. A., Khan, M. H. H., ... & Sattar, G. S. (2021). Prediction of seasonal urban thermal field variance index using

machine learning algorithms in Cumilla, Bangladesh. *Sustainable Cities and Society*, 64, 102542. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102542>

Kalogeropoulos, G., Dimoudi, A., Toumboulidis, P., & Zoras, S. (2022). Urban heat island and thermal comfort assessment in a medium-sized mediterranean city. *Atmosphere*, 13(7), 1102. <https://doi.org/10.3390/atmos13071102>

Karakus, C. B. (2019). The impact of land use/land cover (LULC) changes on land surface temperature in Sivas City Center and its surroundings and assessment of Urban Heat Island. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 55(4), 669-684.

Kurniawan, T. (2024). Strengthening climate resilience: urban water technologies for heat-resilient physical infrastructure in southeast asia cities amidst extreme temperature events and el niño challenges. *Acs Es&t Water*, 4(9), 3713-3724. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00585>

Li, P., Wang, Z. H., & Wang, C. (2024). The potential of urban irrigation for counteracting carbon-climate feedback. *Nature Communications*, 15(1), 2437.

Li, Y., Yang, S., Luo, Y., Zhang, Z., & He, P. (2024). Influence of color steel buildings on urban land surface temperature: a case study in urumqi, xinjiang, china. *Frontiers in Environmental Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1405581>

Martín-Vide, J., Moreno, M. d. C. H., Artola, V. M. d., & Cordobilla, M. J. (2016). Los tipos sinópticos de jenkinson & collison y la intensidad de la isla de calor barcelonesa. *Clima, Sociedad, Riesgos Y Ordenación Del Territorio*, 565-573. <https://doi.org/10.14198/xcongresoaealicante2016-53>

Melchiorri, M., Florczyk, A. J., Freire, S., Schiavina, M., Pesaresi, M., & Kemper, T. (2018). Unveiling 25 years of planetary urbanization with remote sensing: Perspectives from the global human settlement layer. *Remote Sensing*, 10(5), 768.

Mercado Maldonado, L. & Marincic Lovriha, I. (2023). Isla de calor urbana en ciudades del desierto continental. estrategias de mitigación.. <https://doi.org/10.52501/cc.174>

Miao, C., Li, P., Huang, Y., Sun, Y., Chen, W., & Yu, S. (2022). Coupling outdoor air quality with thermal comfort in the presence of street trees: a pilot investigation in shenyang, northeast china. *Journal of Forestry Research*, 34(3), 831-839. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01497-y>

Molina-Gómez, N. I., Varon-Bravo, L. M., Sierra-Parada, R., & López-Jiménez, P. A. (2022). Urban growth and heat islands: A case study in micro-territories for urban sustainability. *Urban Ecosystems*, 25(5), 1379-1397.

Morales-Cervantes, S. 1994. Evolución de la Isla de Calor en la Ciudad de Toluca. Tesis profesional para obtener el título de Licenciada en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras Colegio de Geografía. 219 pp.

Morales-Méndez, C.C., Uribe, M., González-Becerril, L.A. 2007. Isla de calor en Toluca, México. *Ciencia Ergo Sum*, 14:307-316.

Najafzadeh, F., Mohammadzadeh, A., Ghorbanian, A., & Jamali, S. (2021). Spatial and temporal analysis of surface urban heat island and thermal comfort using landsat satellite images between 1989 and 2019: A case study in Tehran. *Remote Sensing*, 13(21), 4469.

Nations, U. (2018). United Nations Department of Economic and social affairs. United Nations, New York.

Nieuwenhuijsen MJ. Green Infrastructure and Health. *Annu Rev Public Health*. 2021 Apr 1;42:317-328. doi: 10.1146/annurev-publhealth-090419-102511. Epub 2021 Dec 14. PMID: 33317317.

OECD| European Commission. (2020). A new perspective on urbanisation.

Ojiako, C. I., Nweke, C. S., Okoye, E. C., & Oju, B. U. URBANIZATION AND THE CHALLENGE OF CITY LIFE IN THIRD WORLD COUNTRIES: TRENDS AND IMPLICATIONS.

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24.

Omer, A. M. (2009). Energy use and environmental impacts: A general review. *Journal of renewable and Sustainable Energy*, 1(5).

OpenAI. (2025). Figura generada con ChatGPT (versión GPT-5) en colaboración con el autor. OpenAI. <https://chat.openai.com/>

Pedrotti, C. (2015). Calidad residencial y condiciones de producción en la vivienda social promovida por el sector privado, Zona Metropolitana de Toluca, 2001-2011. (Tesis Doctoral en Urbanismo). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Ren, Q., He, C., Huang, Q., Shi, P., Zhang, D., & Güneralp, B. (2022). Impacts of urban expansion on natural habitats in global drylands. *Nature Sustainability*, 5(10), 869-878.

Ren, Y., Laforteza, R., Giannico, V., Sanesi, G., Zhang, X., Xu, Ch. 2023. The unrelenting global expansión of the urban heat island over the last century. *Science of the Total Environment*, 880: 163276.

Romero-Dávila, S., Morales-Méndez, C.C., Antonio-Némiga, X. 2011. Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México. *Revista de Climatología*. 11: 1-10.

Rosas-Martínez, M.D., Adame-Martínez, S. 2025. Islas de Calor Urbanas superficiales en Toluca y Zinacantepec, Estado de México en 2022. *Vivienda y Comunidades Sustentables*. 17: 9-24. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i17.299>

Royé, D. & Ezpeleta, A. M. (2015). Análisis de las noches tropicales en la fachada atlántica de la península ibérica. una propuesta metodológica. *Boletín De La Asociación De Geógrafos Españoles*, (69). <https://doi.org/10.21138/bage.1900>

Sangiorgio V, Fiorito F, Santamouris M. Development of a holistic urban heat island evaluation methodology. *Sci Rep*. 2020 Oct 21;10(1):17913. doi: 10.1038/s41598-020-75018-4. PMID: 33087829; PMCID: PMC7578064.
SEIM. (7 de julio de 2023). Sistema Estatal de Información Urbana, Metropolitana y Vivienda. Gobierno del Estado de México.

Seto, K. C., Reenberg, A., Boone, C. G., Fragkias, M., Haase, D., Langanke, T., ... & Simon, D. (2012). Urban land teleconnections and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(20), 7687-7692.

Siddiqui, A., Kushwaha, G., Nikam, B., Srivastav, S. K., Shelar, A., & Kumar, P. (2021). Analysing the day/night seasonal and annual changes and trends in land surface temperature and surface urban heat island intensity (SUHII) for Indian cities. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103374.

Sidiqui, P., Tariq, M. A. U. R., & Ng, A. W. (2022). An investigation to identify the effectiveness of socioeconomic, demographic, and buildings' characteristics on surface urban heat island patterns. *Sustainability*, 14(5), 2777.

Simpson, G. D., & Parker, J. (2018). Data on Peer-Reviewed Papers about Green Infrastructure, Urban Nature, and City Liveability. *Data*, 3(4), 51. <https://doi.org/10.3390/data3040051>

Soni, H., Kant-Yadav, R., Kumar-Patra, S. 2025. Global impact of urbanization on ecosystems: A comprehensive bibliometric analysis. *Natural Hazards Research* 5 (1):21-35. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.04.001>

Suarez, P. A., Cantón, M. A., & Correa, É. N. (2020). Desempeño térmico de fachadas verdes tradicionales de orientación este en viviendas seriadas emplazadas en climas áridos. *Revista Hábitat Sustentable*, 10(2), 82-93. <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.06>

Syrbe, R. U., Neumann, I., Grunewald, K., Brzoska, P., Louda, J., Kochan, B., ... & Bastian, O. (2021). The value of urban nature in terms of providing ecosystem services related to health and well-being: An empirical comparative pilot study of cities in Germany and the Czech Republic. *Land*, 10(4), 341.

Tam, B.Y., Gough, W.A., Mohsin, T., 2015. The impact of urbanization and the urban heat island effect on day to day temperature variation. *Urban Clim.* 12, 1–10.

Tejedor, E., Cuadrat, J. M., Saz-Sánchez, M. Á., Serrano-Notivoli, R., López, N. G., & Aladrén, M. (2016). Islas de calor y confort térmico en zaragoza durante la ola de calor de julio de 2015. *Clima, Sociedad, Riesgos Y Ordenación Del Territorio*, 141-151. <https://doi.org/10.14198/xcongresoaealicante2016-13>

Tratalos, J., Fuller, R. A., Warren, P. H., Davies, R. G., & Gaston, K. J. (2007). Urban form, biodiversity potential and ecosystem services. *Landscape and urban planning*, 83(4), 308-317.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2018, mayo). 2018 revision of world urbanization prospects. United Nations.

Waghchaure, S., Vijay, R., Dey, J., & Thakre, C. (2022). Impact of Land-Use Dynamics on Land Surface Temperature in Mumbai City, India: A Geospatial Approach. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL INFORMATICS LETTERS*, 7(2), 69-79.

Walsh, C. J., Roy, A. H., Feminella, J. W., Cottingham, P. D., Groffman, P. M., & Morgan, R. P. (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society*, 24(3), 706-723.

Wang, M., Zhang, Z., Hu, T., Wang, G., He, G., Zhang, Z., ... & Liu, X. (2020). An efficient framework for producing landsat-based land surface temperature data using google earth engine. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 4689-4701. <https://doi.org/10.1109/jstars.2020.3014586>

Wang, Y., Chan, A., Lau, G.N.-Ch., Li, Q., Yang, Y., Yim, S.H.L. 2019. Effects of urbanization and global climate change on regional climate in the Pearl River Delta

Watts, N., Adger, W. N., Agnolucci, P., Blackstock, J., Byass, P., Cai, W., ... & Costello, A. (2015). Health and climate change: policy responses to protect public health. *The lancet*, 386(10006), 1861-1914.

Xin, J., Yang, J., Wang, L. E., Jin, C., Xiao, X., & Xia, J. (2022). Seasonal differences in the dominant factors of surface urban heat islands along the urban-rural gradient. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 974811.

- Yahia, M.W., Johansson, E., Thorsson, S., Lindberg, F., Rasmussen, M.I. 2018. Effect of urban design on microclimate and thermal comfort outdoors in warm-humid Dar es Salaam, Tanzania. *International Journal Biometeorology* 62:373-385.
- Yang, B., Yang, X., Leung, L.R., Zhong, S., Qian, Y., Zhao, Ch., Chen, F., Zhang, Y., Qi, J. 2024. Model the impacts of urbanization on summer thermal comfort: the role of urban land use and anthropogenic heat. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 6681–6697.
- Yang, J. L., & Zhang, G. L. (2011). Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff. *Journal of soils and sediments*, 11, 751-761.
- Yao, R., Wang, L., Gui, X., Zheng, Y., Zhang, H., & Huang, X. (2017). Urbanization effects on vegetation and surface urban heat islands in China's Yangtze River Basin. *Remote Sensing*, 9(6), 540.
- Yu, P., Wei, Y., Ma, L., Wang, B., Yung, E. H., & Chen, Y. (2024). Urbanization and the urban critical zone. *Earth Critical Zone*, 100011.
- Yu, P., Yung, E. H., Chan, E. H., Wong, M. S., Wang, S., & Chen, Y. (2023). An integrated approach for examining urban fragmentation in metropolitan areas: Implications for sustainable urban planning. *Journal of Cleaner Production*, 419, 138151.
- Zhang, H., Qi, Z. F., Ye, X. Y., Cai, Y. B., Ma, W. C., & Chen, M. N. (2013). Analysis of land use/land cover change, population shift, and their effects on spatiotemporal patterns of urban heat islands in metropolitan Shanghai, China. *Applied Geography*, 44, 121-133. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.07.021>
- Zhang, H., Yu, J., Du, C., Xia, J., & Wang, X. (2019). Assessing risks from groundwater exploitation and utilization: Case study of the Shanghai megacity, China. *Water*, 11(9), 1775.
- Zhang, X. Q. (2016). The trends, promises and challenges of urbanisation in the world. *Habitat international*, 54, 241-252.
- Zheng, Z., Lin, X., Chen, L., Yan, Ch, Sun, T. 2024. Effects of urbanization and topography on thermal comfort during a heat wave event: A case study of Fuzhou, China. *Sustainable Cities and Society*, 103: 105233
- Zou, M. & Zhang, H. (2021). Cooling strategies for thermal comfort in cities: a review of key methods in landscape design. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(44), 62640-62650. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15172-y>

Zuniga-Teran, A. A., Staddon, C., de Vito, L., Gerlak, A. K., Ward, S., Schoeman, Y., & Booth, G. (2020). Challenges of mainstreaming green infrastructure in built environment professions. *Journal of Environmental Planning and Management*, 63(4), 710-732.