



Ciencia y Tecnología
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación



CentroGeo
Centro de Investigación en
Ciencias de Información Geoespacial, A.C.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN
CIENCIAS DE INFORMACIÓN GEOESPACIAL, A.C.**

CentroGeo

Centro Público de Investigación SECIHTI

Potencial de enfriamiento de las áreas verdes y arbolado urbano ante las islas de calor en la Ciudad de México: Estudio de caso de Región de Áreas Verdes Urbanas Centro Poniente 2016-2024

TESIS

Que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias de Información Geoespacial

Presenta

Gustavo Daniel Cruz Gutiérrez

Director de Tesis

Dr. José Mauricio Galeana Pizaña

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS DE INFORMACIÓN GEOESPACIAL, A.C.

CentroGeo

Centro Público de Investigación SECIHTI

Potencial de enfriamiento de las áreas verdes y arbolado urbano ante las islas de calor en la Ciudad de México: Estudio de caso de Región de Áreas Verdes Urbanas Centro Poniente 2016-2024

TESIS

Que para obtener el grado de Maestro en Ciencias de Información Geoespacial

Presenta

Gustavo Daniel Cruz Gutiérrez

Director de Tesis:

Dr. José Mauricio Galeana Pizaña

Sinodales:

Dra. Itzia Gabriela Barrera Alarcón

Dr. Juan Manuel Núñez Hernández

Ciudad de México, marzo 2025

© CentroGeo. Derechos reservados. El autor otorga a CentroGeo el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes.

Resumen

Esta tesis aborda la problemática de las islas de calor urbanas en la Región de Áreas Verdes Urbanas Centro Poniente de la Ciudad de México durante el período 2016-2024. Se emplearon técnicas de percepción remota y análisis espacial, complementadas con el modelo Urban Cooling de InVest, para cuantificar los cambios en el potencial de enfriamiento urbano en el contexto del Plan Maestro de Infraestructura Verde de la CDMX (2018-2024).

La investigación comenzó con una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre las islas de calor, examinando sus causas, efectos y las estrategias de mitigación implementadas a nivel local, nacional e internacional. El modelo Urban Cooling se aplicó para estimar la capacidad de enfriamiento urbano en tres fechas analizadas, permitiendo evaluar el impacto de las áreas verdes y el arbolado urbano existentes, así como el papel de las intervenciones propuestas en el plan de infraestructura verde.

Los resultados revelaron que las áreas verdes urbanas y el arbolado urbano desempeñan un papel crucial en la mitigación de las islas de calor urbano, reduciendo significativamente las temperaturas locales en comparación con las áreas urbanizadas circundantes. Se observó un aumento en la capacidad de enfriamiento urbano entre 2016 y 2024, lo que valida la efectividad de las políticas públicas enfocadas en la revegetación urbana. El modelo Urban Cooling demostró ser una herramienta robusta y eficaz para estimar el impacto de las áreas verdes en la mitigación de las islas de calor urbanas. Sin embargo, se sugiere que futuros estudios consideren la inclusión de factores adicionales, como escenarios de crecimiento urbano proyectado, el cambio climático y la interacción con otras variables climáticas, urbanas e indicadores de vulnerabilidad social.

En conclusión, este trabajo proporciona evidencia sólida sobre el papel de las áreas verdes y el arbolado urbano en la mitigación de las islas de calor urbano en la CDMX, y destaca la importancia de continuar fortaleciendo las políticas públicas de revegetación urbana para mejorar la calidad de vida de los habitantes y reducir los impactos negativos del cambio climático.

Reconocimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. José Mauricio Galeana Pizaña, mi director de tesis, por su invaluable guía, paciencia y apoyo a lo largo de este proyecto. Su experiencia y conocimientos fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Agradezco también a los miembros de mi comité de tesis, la Dra. Itzia Gabriela Barrera Alarcón y el Dr. Juan Manuel Núñez Hernández, por sus valiosos comentarios, sugerencias y por enriquecer mi trabajo con sus perspectivas.

Mi gratitud se extiende al Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (CentroGeo) por brindarme los recursos y el entorno académico para llevar a cabo esta investigación, así como a los profesores y compañeros que influyeron en mi aprendizaje y mi trabajo.

Expreso mi profundo agradecimiento a toda mi familia, pero en especial a mis padres, Lorenia Gutiérrez y Gustavo Cruz por su cariño, por creer en mí y por constantemente motivarme a seguir adelante, este trabajo fue posible gracias ustedes. A mi hermano, David Cruz, por estar siempre presente. También a mis abuelitas, Irma Vilchis y Sara Bello, por su cariño y sabiduría, que han sido una fuente de inspiración.

A Eunice Madrigal le agradezco, por su amor, su paciencia y su apoyo incondicional durante este proceso. Constantemente tus palabras me motivaron a seguir adelante cuando ya no podía, siempre te estaré agradecido.

También quiero agradecer a mis amigos, Santiago Banda, Alan Márquez, José Luis “Chelo”, Sharon Dávila, Elena Escobar, Sergio Salinas, Beto De León, Adriana García, Santiago Reyes, Raúl Aguilera y Karla Rojas, por su amistad, apoyo y por celebrar conmigo cada logro.

Y por supuesto a Yuki Cruz, por su compañía durante largas horas de trabajo.

A todos ustedes, ¡muchas gracias por todo!

Contenido

Introducción	1
Problemática	1
Justificación	2
Objetivos	4
Objetivo General	4
Objetivos particulares	4
Capítulo 1 Antecedentes/Marco teórico	5
Crecimiento y planeación urbana	5
Cambio de uso de suelo	7
Cambio de uso de suelo urbano	8
Cambio climático	9
Cambio climático en México	11
Cambio climático en la CDMX	11
Islas de calor urbano	12
Causas	14
Efectos	17
Áreas verdes/Infraestructura verde de la Ciudad de México	18
Áreas verdes	18
Áreas verdes en la Ciudad de México	19
Estado del arte	20
Internacional	20
Análisis de factores y causas	20
Análisis espacio temporales	21
Análisis de de estrategias de mitigación	22
México	24
Análisis de factores y causas	24
Análisis espacio temporales	24
Análisis de de estrategias de mitigación	24
Ciudad de México	25
Capítulo 2 Métodos	26
Área de estudio	26
Crecimiento urbano	29
Método	29
Estimación de áreas verdes y arbolado urbano 2016, 2020 y 2024	30
Estimación de islas de calor urbano	39
Cálculo de la capacidad de enfriamiento urbano 2016, 2020 y 2024	46
Parámetros	47

Capítulo 3 Resultados	50
Estimación de áreas verdes y arbolado urbano 2016, 2020 y 2024	50
Estimación de islas de calor urbano	55
Capacidad de enfriamiento urbano 2016, 2020 y 2024	64
Capítulo 4 Discusión	74
Áreas verdes	74
Islas de calor	75
Implementación del modelo Urban Cooling	76
Limitaciones	78
Perspectivas	79
Capítulo 5 Conclusiones	80
Índice de ilustraciones	81
Índice de tablas	83
Bibliografía	116

Introducción

Problemática

El crecimiento y la expansión de las zonas urbanas son resultado de diversos factores entre los cuales se encuentran la industrialización y la migración de áreas rurales a áreas urbanas. Esto provoca un aumento en la densidad de población en las zonas urbanas, principalmente en las zonas centrales, lo cual a su vez provoca que paisajes naturales preexistentes con vegetación sean reemplazados por construcciones (viviendas), superficies pavimentadas u otras infraestructuras que junto con la densidad poblacional, el tránsito vehicular y las actividades de la población contribuye a la formación de islas de calor urbanas (Hulley, 2012; Marincic, 2022; Mercado, 2022).

Las islas de calor son aquellas zonas en las cuales se presenta un aumento en la temperatura del aire o de la superficie de una zona urbana comparada con la temperatura de áreas no urbanizadas o con una urbanización menor, la escala puede ser a nivel de ciudad (zona urbana) o en una escala menor, una zona localizada que posee una temperatura mayor que sus alrededores debido a sus condiciones: pocos espacios verdes, grandes extensiones de desarrollo comerciales, una alta densidad de edificios que evita la buena circulación de viento, cobertura del pavimento, falta de cuerpos de agua, actividades humanas como transporte, calefacción o alumbrado y materiales de construcción no adecuados o no reflejantes que absorben temperatura de forma progresiva y disipan el calor más lentamente que los suelos no urbanos (Aragoneses de la Rubia, 2020; Araiza-Olivares, 2022; Li, 2016).

Las islas de calor pueden tener impactos negativos severos entre los cuales se encuentran reducción del confort humano, aumento de la energía usada para el enfriamiento de edificios y vehículos, baja calidad del aire y del agua y problemas de salud, como enfermedades cardiovasculares cancerígenas respiratorias y aumento en la susceptibilidad a alergias e infecciones en los pulmones, así como de golpes de calor.

A pesar de la polémica que rodea el cambio climático, existe un consenso acerca del aumento de la temperatura del planeta causado por las actividades antropogénicas hecho que continuará en un futuro, estos cambios exacerbarán el efecto de las islas de calor haciéndolo uno de los problemas más importantes para la humanidad en el siglo XXI (Hulley, 2012; Jauregui, 1997; Li, 2016; Marincic, 2022; Mercado, 2022).

En Ciudad de México, se estima el aumento promedio de la temperatura 0.62°C por década debido al crecimiento urbano ocurrido durante el siglo XX, comparado con el 0.07°C por década atribuido al calentamiento global (Jauregui, 2005). En este sentido, hay una diversidad de estudios para comprender los factores causales, como destaca el análisis del cambio de uso de suelo y su relación con la calidad de aire y el clima, atribuyendo el aumento de temperatura en la Ciudad de México al crecimiento del área urbana y el crecimiento vertical (Cui & De Foy, 2012)..

Otros trabajos se han enfocado en profundizar en los factores que inciden en la formación de islas de calor y el papel de las edificaciones, la circulación del aire, la vegetación y la evaporación (Hernández Godínez, 2019; Jáuregui Ostos & Luyando, 1998). Finalmente, otros estudios se enfocan en caracterizar los efectos de las islas de calor en la ciudad dentro de los cuales se encuentran el aumento y permanencia de temperatura elevadas, temperaturas mínimas más elevadas, sequías y lluvias más fuertes, así como sus afectaciones hacia la vida y salud de la población y el aumento en el consumo de energía eléctrica y de agua (Hernández Godínez, 2019).

Algunas de las medidas que se han empleado son la colocación de vegetación en puntos estratégicos urbanos, azoteas verdes, pintar superficies de blanco, mantener y preservar la vegetación de las áreas verdes, crear áreas verdes en las viviendas, así como que los nuevos proyectos de vivienda y edificaciones tengan un enfoque bioclimático. (Hernández Godínez, 2019).

Las viviendas con enfoque bioclimático se caracterizan por buscar alcanzar la eficiencia energética a través de un diseño que aproveche de la mejor manera los factores medioambientales de la región como: la ubicación, la topografía, la elevación, la hidrografía, la temperatura, la humedad, la precipitación y la radiación solar entre otros. Con base en las características medioambientales se adapta el diseño de la vivienda: la forma, la orientación, la distribución interior y los materiales. (Cordero & Guillén, 2013; Discoli et al., 2011; Vidal Vidales et al., 2012)

Justificación

A causa de sus efectos en los últimos años, las islas de calor han llamado más la atención de organizaciones no gubernamentales como: el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) y la Organización de las Naciones Unidas (ONU) a través de su programa ambiental “Alianza Global para la Edificación y la Construcción” (GlobalABC) y también de gobiernos que buscan mitigar sus efectos mediante diversas acciones: el gobierno de la Ciudad de México a través de la Comisión de Preservación del Medio Ambiente, Cambio Climático y Protección Ecológica así como el gobierno de los Estados Unidos mediante la Agencia De Protección Ambiental (EPA). (Congreso de la Ciudad de México, 2025; EPA, 2025; ONU, 2025; WWF, 2025)

A nivel global, destacan las soluciones e iniciativas con el objetivo de mitigar estos fenómenos para así reducir el riesgo a la salud de la población, el uso de energía para el enfriamiento de viviendas e incrementar el confort de las personas. Algunas de las cuales están basadas en el incremento de áreas verdes como techos verdes y parques, la movilidad sustentable como el fomento de la bicicleta y el transporte público y la implementación de materiales de construcción reflectantes y las viviendas con enfoque bioclimático. (Graizbord et al., 2024; Larena, 2020; Marincic, 2022).

Ante esta problemática, en la Ciudad de México, se ha incorporado el tema en la agenda pública, tal como se refleja en diversos instrumentos de política pública ambiental. Por ejemplo, desde el

30 de agosto de 2007 el gobierno de la Ciudad de México dio a conocer el Plan Verde de la Ciudad de México que incluía las estrategias y acciones a tomar en 15 años para llevar a la CDMX hacia una sustentabilidad en su desarrollo. A través de siete ejes temáticos Suelo de conservación, Habitabilidad y espacio público, Agua, Movilidad, Aire, Residuos sólidos y Cambio climático y energía (Gobierno del Distrito Federal, 2007; Gobierno del Distrito Federal, 2011).

Las medidas de mitigación de las islas de calor se ven beneficiadas por las acciones relacionadas con los temas de habitabilidad y espacio público así como con el cambio climático y el uso de energía. Algunas de estas acciones incluyen la creación y regeneración de áreas verdes, creación y regeneración de parques, impulsar el desarrollo de vivienda y edificaciones sustentables, incrementar la superficie naturalizada de azoteas, reforestación urbana, rehabilitación de cuerpos de agua y así como las acciones presentadas en el Plan de Acción Climática de la Ciudad de México Estrategia y el Programa Especial de la Red de Infraestructura Verde de la Ciudad de México. Cabe mencionar en dichos documentos sólo se habla que estas acciones pueden reducir el efecto de las islas de calor mas no son específicas para su mitigación (Gobierno del Distrito Federal, 2012; Gobierno del Distrito Federal, 2011; SEDEMA, 2023)

En la actualidad, existe el Programa Ambiental y de Cambio Climático Para La Ciudad De México 2019-2024 el cual maneja 7 ejes: revegetación del campo y la ciudad, rescate de ríos y cuerpos de agua, manejo sustentable del agua, basura cero, movilidad integrada y sustentable, calidad del aire y ciudad solar. Las medidas para mitigar el efecto de las islas de calor se encuentran en el eje de revegetación del campo y la ciudad, específicamente en la conservación y rehabilitación de bosques urbanos y parques a través del programa Sembrando Parques (Gobierno de la Ciudad de México, 2019).

Desde el 2019 han existido alrededor de 300 proyectos los cuales han estado enfocados a la recuperación de áreas verdes cuerpos de agua y espacios públicos, algunos de los principales son: ANP. Cerro de la Estrella, ANP. Parque ecológico de la Ciudad de México, ANP. Parque ecológico de Xochimilco, ANP. Sierra de Guadalupe, ANP. Sierra de Santa Catarina, bosque de Tláhuac, Bosque de Chapultepec, bosque de San Juan de Aragón, Canal Nacional, deportivo el Vivero Cuauhtépec, parque Cantera, parque Ciprés, parque ecológico Cuitláhuac, parque Leona Vicario, parque lineal Avenida Chapultepec, parque lineal Gran Canal Ave Fénix, parque lineal Vicente Guerrero, parque lineal eje 6, Río Eslava, Río Magdalena, Río Tacubaya, Río San Buenaventura, Río de los Remedios y Río Santiago. (SEDEMA, 2023)

Aunque existen algunos trabajos específicos para la Ciudad de México donde se evalúa a la vegetación de los parques como mitigación de las islas de calor urbana e incluso se propone colocar en puntos estratégicos arreglos de vegetación urbana (Ballinas & Barradas, 2016), aún persiste la necesidad de evaluar con mayor profundidad no solo la efectividad de las áreas verdes como los parques, pero que tanto impacta en realidad el arbolado urbano disperso existente en la mitigación del efecto de isla de calor y a una mayor escala, en específico con el apoyo de un software especializado como lo es Urban Cooling de Invest .

La capacidad de enfriamiento urbano de estos espacios, varía según factores como la ubicación, la topografía y el tamaño del área verde así como el tipo, la densidad y la distribución de vegetación, aunque también factores de la ciudad afectan como lo es la densidad, la forma, orientación y tamaño de las casas y edificios, todo esto debe ser mejor comprendido para maximizar el impacto y guiar las futuras intervenciones urbanas (Torre, 2009). Esta evaluación es fundamental no sólo para optimizar el uso de recursos en programas como el de 'Sembrando Parques', sino también para diseñar políticas públicas más eficaces que logren reducir las temperaturas urbanas y sus efectos en la salud pública y el consumo de energía.

Con base en lo anterior, el presente trabajo de investigación es guiado por las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Qué son las islas de calor urbano, así como cuáles son sus causas y sus efectos?
- ¿Cuáles son los avances en la investigación de este fenómeno en el mundo, en el país y en la CDMX?
- ¿Cómo las áreas verdes y el arbolado urbano afectan la capacidad de enfriamiento de la ciudad a lo largo del tiempo basado en los planes de infraestructura verde de la CDMX?

Objetivos

Objetivo General

Evaluar los cambios en el potencial de enfriamiento urbano de las áreas verdes y arbolado urbano en la Región de Áreas Verdes Urbanas Centro Poniente en el contexto del plan maestro de infraestructura verde de la CDMX (2018-2024).

Objetivos particulares

Examinar los estudios relacionados con islas de calor en CDMX que permita describir el contexto e importancia.

Analizar y describir los cambios en las áreas verdes y arbolado urbano en el periodo coberturas de vegetación 2016-2024

Estimar la capacidad de enfriamiento con relación a la dinámica de las áreas verdes y arbolado urbano existentes, así como el papel de las propuestas en el plan de infraestructura verde de la CDMX.

Para poder resolver los objetivos, esta tesis se divide en cuatro capítulos principales. En el capítulo de Antecedentes/ Marco teórico se habla del crecimiento y planeación urbana, cambio de uso de suelo, cambio climático islas de calor y Áreas verdes/Infraestructura verde de la Ciudad de México como bases y fundamentación del trabajo además de una revisión del estado del arte internacional, nacional y local. En el capítulo de Metodología se establece el área del estudio y el crecimiento urbano presente en el área, así como los procedimientos, técnicas y herramientas para la estimación de áreas verdes y arbolado urbano, la estimación de islas de calor urbano y el cálculo de la capacidad de enfriamiento urbano para las tres fechas analizadas. Para el capítulo

de resultados se presentan mediante mapas, tablas y descripciones de las distintas fechas los hallazgos obtenidos a partir del procesamiento descrito en la metodología. El capítulo de discusión está compuesto de la interpretación de los resultados respecto a los objetivos, así como la comparativa con otros resultados de investigaciones previas y las limitantes del trabajo. Finalmente, las conclusiones simplifican las ideas principales resultantes del trabajo.

Capítulo 1 Antecedentes/Marco teórico

Crecimiento y planeación urbana

A partir de la década de 1950, se aceleró el proceso de urbanización en América Latina debido a que los gobiernos impulsaron actividades urbanas como la industria y los servicios, favoreciendo la “modernización”. Durante este proceso de modernización se hicieron presentes patrones de migración, principalmente movimientos rurales a urbanos que continúan hasta el día de hoy. Aunque es posible apreciar una pérdida en la importancia relativa de las ciudades más grandes, no es posible decir que existe un proceso de desconcentración demográfica significativa, ya que existen comportamientos migratorios más complejos y una mayor cantidad de ciudades de gran tamaño que el pasado (P. da Cunha & Rodríguez Vignoli, 2009).

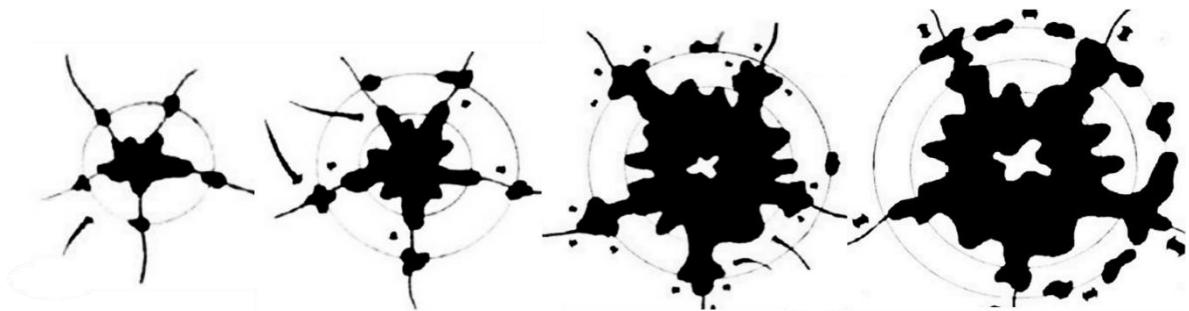


Fig. 1.1 Dinámica de crecimiento urbano: mancha urbana de ciudad pequeña, ciudad mediana, metropolización y fortalecimiento de subcentros urbanos y decaimiento del centro histórico (Bazant S., 2010).

Las tendencias de crecimiento físico-espacial de las ciudades están divididas en 4 etapas (figura 1.1):

1. Ciudad pequeña con menos de 100,000 habitantes tiene un bajo nivel de crecimiento demográfico, su expansión es concéntrica a su centro, existen poblados a lo largo de las carreteras (Bazant S., 2010).
2. Inicio de ciudad media entre 100,000 y 500,000 habitantes con un intenso crecimiento demográfico a causa de la migración, la expansión ocurre a lo largo de las carreteras formando corredores comerciales, las pequeñas ciudades cercanas comienzan a ser absorbidas (Bazant S., 2010).
3. Ciudades medias con indicios de metropolización con una población de 500,000 a 1,000,000, continua el crecimiento demográfico. La expansión es dispersa ocupando grandes áreas lo que provoca nuevas zonas urbanas, los corredores urbanos se convierten

en avenidas primarias, más servicios se encuentran en la periferia generando nuevos centros comerciales o conjuntos de viviendas. Inicia un decaimiento del centro histórico debido a la inaccesibilidad y el alto costo de los edificios al ser monumentos (Bazant S., 2010).

4. Ciudades medias con alto nivel de dispersión con poblaciones mayores a 1,000,000 la densidad poblacional de la ciudad aumenta, la ciudad es poco funcional debido a la mala estructura urbana como las vialidades haciendo que recorridos interurbanos sean prolongados y complicados. El centro histórico tiene decadencia económica y social ya que los comercios y oficinas se desplazan así a los anillos intermedios o periferias y hay que tiene una mejor accesibilidad. Aparecen subcentros en ciudades asimiladas o en nuevos centros comerciales permitiendo que se realicen proyectos de vivienda alejados de la ciudad (Bazant S., 2010) .

El crecimiento urbano, demográfico y espacial, ocasiona una recomposición de la centralidad urbana, esto debido a que las ciudades polarizan el espacio geográfico ya que concentran bienes y servicios (Beuf, 2012).

La necesidad de planeación surge de dos conceptos interconexión y complejidad, en la era actual donde existe una gran cantidad de personas y tecnologías avanzadas es muy diferente los efectos que pueden tener la construcción de un edificio habitacional comparado con una sola casa para una sola familia, por lo cual es necesario un plan en el cual se tomen en cuenta las necesidades de un gran número de personas (disponibilidad de agua, la calidad de las carreteras así como su capacidad) así como los efectos que pudieran tener en los alrededores (la cantidad de tráfico, la contaminación auditiva, la contaminación del aire). Estas decisiones afectarán a la gente que habitara la zona al definir el uso del suelo, el costo, las rentas, etc. y tendrán efectos en economía de la comunidad así como la demanda de servicios de educación, sociales y recreativos (Levy, 2015).

El objetivo primordial de la planeación urbana en una comunidad en crecimiento es definir patrones de crecimiento para obtener un patrón de uso de suelo sensato y atractivo, esto significa evitar un desarrollo excesivamente denso o muy fragmentado, brindando a los habitantes un fácil acceso a instalaciones recreativas, culturales, escolares, comerciales y otros tipos, mientras se evita mezclar usos de suelo incompatibles (áreas residenciales y comerciales de alta intensidad). También el patrón de calles debe ser apropiado para que el tráfico fluya sin sufrir un congestionamiento excesivo y es las ciudades modernas se incluye infraestructura para peatones, bicicletas y transporte público (Levy, 2015).

En los últimos años la planeación urbana ha adoptado un enfoque ambiental, principalmente en la búsqueda de reducir el daño ambiental, buscado alternativas o reduciendo el uso de energías no renovables en las edificaciones y el transporte, así como el desarrollo de parques y espacios abiertos(Levy, 2015).

En la planeación urbana, la mitigación del exceso de calor se enfoca principalmente en la regulación de microclimas a una escala peatonal o de edificios, buscando mejorar el confort humano a partir de la creación de espacios al aire libre. Para la mitigación de las islas de calor urbano existen varios métodos que incluyen la distribución estratégica de vegetación y cuerpos de agua así como la implementación de infraestructura verde (Zawadzka et al., 2021).

Aunque la planeación urbana en México comienza formalmente en las primeras décadas del siglo XX, las ciudades mexicanas ya habían tenido una intervención de planeación basada en las concepciones urbanas y de diseño del espacio español al menos hasta el siglo XVIII (José & Chaparro, 2009).

En 1976 el congreso de la unión expide la ley general de asentamientos humanos en donde se define como un asentamiento urbano un determinado conglomerado demográfico, establece la participación de las autoridades federales, estatales y municipales y en el artículo 4 se menciona la ordenación y regulación de los asentamientos humanos mediante planes de desarrollo urbano pertinentes para cada nivel de las autoridades (DOF, 1976).

En México se da un crecimiento urbano acelerado a principio de la década de los 90s con la reforma al artículo 27 de la constitución mexicana, cambiando la ley agraria e introduciendo el Programa de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares Urbanos (PROCEDE).

El objetivo de la reforma al artículo 27 fue inducir la modernización del campo y aumentar la productividad al otorgar certidumbre jurídica a la tenencia de la tierra y permitir asociaciones entre todo tipo de productores, dando como resultado una mayor inversión privada y la capitalización del campo. Esto significaba que la nueva ley agraria hacía posible la privatización de las tierras ejidales que eran anteriormente consideradas propiedad comunal, mientras que el programa PROCEDE se encargó de la medición, mapeo y el registro de las parcelas (Lozano, 2005; Nuijten, 2003).

Cambio de uso de suelo

La magnitud, extensión y velocidad de las alteraciones antropológicas sobre la superficie de la tierra nunca habían sido tan grandes en toda la historia de la humanidad. La demanda de bienes como alimento, vivienda, agua potable y servicios ambientales generan constantemente una presión sobre los recursos naturales con impactos negativos sobre la estructura, funcionamiento y distribución de los recursos (Aguayo et al., 2009; Cuevas et al., 2009).

Alrededor de la mitad de la superficie de la tierra ha sido directamente transformada por las acciones del hombre y estos cambios han sido tan dramáticos que semejan el nivel de transformación sufrido durante los periodos glaciares. De 1700 a 1990, cerca de 1,621 millones de hectáreas fueron convertidas en terrenos agrícolas y 2,927 millones fueron transformadas en áreas de pastoreo (Aguayo et al., 2009).

El concepto de cambio de uso de suelo surge a finales del siglo XIX del ámbito de las Ciencias Sociales y agronomía ya que el uso del suelo es el resultado de la actividad del hombre sobre la cubierta del suelo es decir se trata de patrones primordialmente culturales (Velázquez et al., 2014).

La definición más sencilla de uso de suelo son las diferentes formas en las que se emplea el terreno y su cubierta vegetal. Son las acciones humanas de manejo resultado del contexto cultural de diversos grupos sociales que tienen una jurisdicción sobre la tierra llamada su capital o patrimonio (Caciano et al., 2013; Velázquez et al., 2014).

La mayor parte de los impactos son causados por la pérdida y/o transformación de ecosistemas boscosos y praderas naturales en terrenos para el desarrollo agrícola, ganadero, forestal, urbano e industrial. Entre 1700 y 1992, cerca de 1,621 millones de hectáreas fueron cambiadas para ser usadas en la agricultura de las cuales 885 millones eran bosque, 665 millones sabana, pradera o estepa, 150 millones matorrales y 21 millones tundras o desiertos. Las áreas de pastoreo y cultivo ocupan el 40% de la superficie de la tierra (Aguayo et al., 2009).

En el siglo XIX aumenta el crecimiento urbano debido a cambios en los esquemas de asentamiento de la población en el planeta. Este fenómeno mundial es sumamente acelerado, explosivo y en ocasiones incontrolado por lo cual termina generando megaciudades que generan problemas ambientales, congestión, problemas sociales, problemas económicos, problemas energéticos entre otros (Ramírez & Pértile, 2013).

En las últimas décadas el cambio de uso de suelo se ha convertido en uno de los factores plenamente implicados en el cambio climático regional y global, alterando procesos y ciclos, lo anterior se vuelve trascendental si se considera que es a través de estos cambios donde se materializa la relación entre el hombre y el ambiente (Aguayo et al., 2009; Pineda Jaimes et al., 2009).

El cambio de uso de suelo es considerado la primera causa de alteración del suelo y afecta fuertemente las capacidades de los sistemas biológicos para soportar y satisfacer las necesidades humanas lo que al mismo tiempo aumenta la vulnerabilidad de ecosistemas y personas ante desastres naturales. El impacto más grande es la pérdida de diversidad al transformar la cobertura vegetal, la pérdida, modificación y fragmentación de hábitats ha provocado una disminución en la biodiversidad mundial, el proceso de urbanización consta de eliminar ecosistemas naturales para crear uno urbano, la flora y la fauna se pierde, se perturba o se modifica asimismo el suelo, la fisiografía, la hidrología, entre otros muchos aspectos son cambiados para el beneficio de la ciudad y del ser humano (Aguayo et al., 2009; López González et al., 2021b).

Cambio de uso de suelo urbano

El cambio de uso de suelo a causa del crecimiento urbano suele ocurrir en las zonas periurbanas donde el uso rural pasa a ser usos urbanos como residenciales, comerciales o de servicios a este tipo de cambio de uso de suelo se le denomina expansión urbana, sin embargo, existe otro tipo

llamado relleno urbano. El relleno urbano se puede considerar como aquel cambio que ocurre de no urbano a urbano al rellenar los espacios libres que quedan dentro de la rea urbana existente (Camagni et al., 2002; Cruz-Bello et al., 2023).

La expansión urbana tiene un efecto negativo en el crecimiento de las ciudades ya se caracteriza por viviendas unifamiliares de baja densidad a las afueras de la ciudad con un patrón de crecimiento no definido con una alta dependencia del automóvil. Esto puede generar problemas como aumento de la desigualdad a medida que se pierde el límite entre áreas urbanas y rurales, impactos ambientales como pérdida de zonas ecológicas y contaminación del aire, así como un aumento en los costos de los servicios municipales y mayor necesidad de transporte (Arku, 2021).

El relleno urbano consiste en construcción en baldíos o el desarrollo de sitios subdesarrollados, al expandir ampliar o convertir edificios preexistentes para obtener un uso del suelo más eficiente, esto llena los vacíos en áreas establecidas logrando de esta manera revitalizar las comunidades y mejorar la conservación de recursos (Arku, 2021).

Algunos de los factores que pueden causar el relleno urbano son las continuas migraciones interurbanas, así como procesos de gentrificación, ambos fenómenos causantes de transformaciones urbanas. Estas transformaciones tienen como primer detonante la protección y valoración del patrimonio existente sin embargo esto causa un impacto económico, cultural y social posterior (Hernandez, 2014).

Con el continuo crecimiento de las ciudades Las zonas más externa presentan algunos de los problemas cómo desigualdad y altos tiempos de traslado, esto causa que haya migración intraurbana hacia la parte centrales de la ciudad en busca de una mejor calidad de vida y tiempos de traslado menor (Arku, 2021).

La gentrificación surge a partir de mecanismos que tienen como objetivo final lograr el desplazamiento progresivo de hogares con bajos recursos de los centros urbanos que se encuentran en transformación perfecta, lo cual implica un cambio en la estructura social y espacial (Janoschka & Sequera, 2014).

Tanto la gentrificación como las migraciones intraurbanas generan transformaciones urbanas, las cuales se ven representadas por estrategias de inversión inmobiliaria, la construcción de edificios de vivienda y la construcción en predios baldíos, lo cual al mismo tiempo causa que exista una renovación urbana causando que los procesos de gentrificación y migraciones interurbanas tengan un mayor impacto (Hernandez, 2014; Janoschka & Sequera, 2014).

Cambio climático

El cambio climático es un problema global y uno de los más grandes en la actualidad, es de interés tanto para las instituciones científicas y políticas como para la sociedad, ha sido estudiado por expertos en todo el mundo, quienes han concluido que el clima cambia debido a causas naturales

y a causas de origen antropológico durante periodos de tiempos prolongados (Díaz Cordero, 2012; Pardo Buendía, 2007; Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2021).

El calentamiento global y el cambio climático son conceptos estrechamente relacionados en ocasiones confundidos. Son fenómenos provocados total o parcialmente por el aumento de concentración de gases invernadero en la atmósfera principalmente el CO₂ los cuales están relacionados directa o indirectamente con las actividades antropométricas como el uso de combustibles fósiles y la deforestación, impidiendo que los rayos del sol salgan de la tierra, y se ve reflejado en un cambio en la temperatura y las precipitaciones del agua (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007; González Elizondo et al., 2003; Pardo Buendía, 2007).

El clima mundial ha permanecido significativamente estable durante los últimos 10,000 años lo que ha permitido las condiciones adecuadas para el desarrollo de la especie humana sin embargo hoy existen señales claras de que el clima está cambiando. Desde la década de 1950 se han observado cambios que no habían sucedido con anterioridad: el calentamiento de la atmósfera, el calentamiento de los océanos, la disminución del volumen de nieve y hielo, el aumento en el nivel del mar, blanqueamiento de los corales, menor disponibilidad de agua dulce y el aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero. También se ha señalado una creciente tendencia en la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos que continuarán siendo más frecuente en el futuro como: altas temperaturas, sequías, olas de calor, huracanes, fuertes precipitaciones (Fernández, 2013; Oficina de Cambio Climático & Ministerio del Medio Ambiente, 2014; Schramek & Harmeling, 2020).

La temperatura global de la tierra ha aumentado 0.7°C en el último siglo y hay estimaciones que, de no aplicar esfuerzos adicionales a la mitigación del aumento de temperatura, podría aumentar entre 3 °C y 5°C durante el siglo XXI respecto a los niveles preindustriales. Se ha planteado reducir este aumento a 2 °C en relación con los niveles de temperatura preindustrial esto supone un reto tecnológico económico institucional y de comportamiento. En el 2020 el G 20 ha cambiado este valor a 1.5 °C con el Acuerdo de Cambio Climático de París(Oficina de Cambio Climático & Ministerio del Medio Ambiente, 2014; Pardo Buendía, 2007; Schramek & Harmeling, 2020).

Los impactos del cambio climático pueden poner en riesgo el desarrollo de los países y la integridad de los ecosistemas a nivel mundial, distintas especies animales y vegetales en la tierra dependen de un equilibrio permanente entre factores muy diversos, muchos de los cuales ya se encuentran debilitados por la contaminación y la pérdida de hábitat no sobrevivirían a un cambio en la temperatura, en cuanto a la especie humana el desarrollo socioeconómico de las poblaciones y su correspondiente crecimiento demográfico se vería afectado por los cambios climáticos provocando migraciones forzadas, pérdida de cultivos, inaccesibilidad a alimentos, pérdida de vivienda, entre otros(Fernández, 2013; Oficina de Cambio Climático & Ministerio del Medio Ambiente, 2014; Schramek & Harmeling, 2020).

Cambio climático en México

Diversos estudios han demostrado que México es vulnerable al cambio climático, dado que el 15% del territorio, 68.2% de la población y el 71% del producto interno bruto es propenso a sufrir consecuencias negativas por el cambio climático (Cavazos et al., 2013; Sosa, 2015).

Continuar con esta economía basada en el consumo de combustibles fósiles podría causar un cambio en la temperatura promedio anual en el país aumentando de 0.5 a 4.8°C en el periodo de 2020 a 2100, esto podría provocar una reducción en la precipitación de hasta 15% durante el invierno y 5% en el verano mientras que la temporada de lluvias podría retrasarse hasta otoño (Sosa, 2015).

La temperatura superficial del Mar Caribe, el Golfo de México y el Pacífico Mexicano podría aumentar entre 1 y 1.5 °C favoreciendo la ocurrencia de ciclones y huracanes, así como la pérdida de biodiversidad marina. Las estructuras ubicadas en la zona costera del país estarían en redes o debido al incremento proyectado del nivel del mar que puede llegar hasta 5 m sobre el nivel actual. Las aguas continentales sufrirían una disminución en la precipitación y el escurrimiento provocando condiciones de escasez y una mayor presión sobre los recursos hídricos (Martínez & Patiño, 2012; Sosa, 2015).

El aumento en las temperaturas regionales y locales puede superar la capacidad de adaptación de algunas especies causando su extinción, también los bosques estarían más expuestos a incendios forestales y el cambio en el ciclo hidrológico podría provocar una pérdida acelerada de servicios ambientales, la producción de cultivos también se vería afectada llegando al punto de que ciertos tipos de cultivos ya no puedan ser producidos en algunas regiones del país (Martínez & Patiño, 2012; Sosa, 2015).

Cambio climático en la CDMX

La Ciudad de México es el Centro Cultural económico e industrial del país está ubicada en la parte central del cinturón volcánico trans mexicano con una elevación de 2400 m sobre el nivel del mar, dentro de la cuenca del valle de México rodeado de sierras de origen volcánico esto causa que tengan características ambientales especiales cómo el clima. Tiene un clima tropical de montaña o tropical atemperado con una temperatura promedio anual de 12° a 18°C con los valores máximos de hasta 33.5 °C en abril y mayo, cuenta con tres temporadas una seca-caliente en marzo a mayo, una de lluvia junio a octubre y seca-fría de noviembre a febrero (Jauregui, 1997; Larena, 2020; Soto Montes de Oca et al., 2009).

Durante el siglo XX la Ciudad de México tuvo un crecimiento exponencial duplicando su tamaño en termino de superficie de 1950 a 1970 y lo triplicándolo para el año 2000, debido al aumento demográfico natural y la migración producida por la centralización que ofrecía más empleos y mejores salarios. Esto provocó un crecimiento territorial desordenado con patrones de expansión acelerados que son ambiental y económicamente inviables a largo plazo (Delgado Ramos et al., 2015; Soto Montes de Oca et al., 2009).

El 7.5% de la población nacional habita en la CDMX y concentra el 16.5% del producto interno bruto nacional, esto provoca un alto volumen de ingresos, empleos, prestación de servicios y de consumo de servicios, lo cual contribuye con el 3.2% de las emisiones de compuestos y gases de efecto invernadero nacionales causantes del cambio climático (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2021) .

La ciudad de México posee muchas de las características de vulnerabilidad ante eventos naturales más frecuentes del país, sin embargo, aunado a esto tiene una gran actividad industrial y socioeconómica lo cual produce una gran cantidad de contaminantes aumentando el índice de vulnerabilidad. Dentro de los eventos extremos causados por el cambio climático las delegaciones más propensas a ser afectadas en la CDMX son(Sánchez Vargas et al., 2011) :

Temperatura alta: Gustavo A. Madero, Iztacalco y Venustiano Carranza

Temperatura baja: Cuajimalpa, Tlalpan y Xochimilco

Precipitación alta: Cuajimalpa y Tlalpan

Precipitación baja: Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa y Venustiano Carranza

El cambio climático podría reducir la disponibilidad de agua causando repercusiones severas en la Ciudad de México debido a su dependencia de fuentes externas y el alto costo que implicaría la búsqueda de nuevas fuentes para abastecerse ya que la CDMX se encuentra en un estado de alto estrés hídrico (Aguilar, 1999; Delgado Ramos et al., 2015; Sosa, 2015).

La CDMX no sólo es responsable de contribuir a la problemática del cambio climático, también está expuesta ambiental, económica y socialmente a los diversos impactos adversos que podrían existir, por lo cual debe ser líder en el esfuerzo nacional e internacional para la acción climática (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2021).

Islas de calor urbano

El aumento de temperatura así como la presencia de aire caliente sobre las ciudades ha sido documentado desde 1833 cuando se identificó una diferencia de temperatura entre la metrópolis inglesa con sus alrededores y a partir de la segunda mitad del siglo XX se han aumentado los estudios de este fenómeno denominado como islas de calor urbano, las cuales pueden ser definidas como una capa de aire que se encuentra sobre una ciudad o un área desarrollada con una temperatura mayor a la de sus alrededores o un aumento en la temperatura de la superficie de más de 2 °C en promedio, presentan forma concéntrica con las isothermas (Aragón et al., 2020; Hernández Godínez, 2019; Hulley, 2012; Martínez Martínez, 2014; Rivera Rivera, 2012).

Las ciudades absorben y almacenan el calor en las superficies lo que provoca un aumento en la temperatura del aire que se encuentra sobre la superficie, este calor puede seguir liberándose hasta la noche esto debido a los distintos materiales y su capacidad calorífica, todo este proceso provoca una mayor temperatura en comparación con los entornos circundantes no urbanizados

(Aragón et al., 2020; Hernández Godínez, 2019; Soberón Forsberg & Obregón Párraga, 2016). Además del efecto a nivel ciudad que puede provocar las islas de calor también puede describir un efecto localizado en un área más pequeña dentro del área urbana, esto sucede cuando hay áreas con mayor temperatura respecto a las áreas circundantes inmediatas lo cual crea puntos calientes, el efecto de este último tipo suele ser más severo que el del nivel de ciudad ya que tiene efectos más directos en peatones edificios y vehículos (Li, 2016).

Las islas de calor urbano se dividen en superficiales, subsuperficiales y atmosféricas de acuerdo con el medio que se esté midiendo. El primero está definido por la diferencia en temperatura entre carreteras y edificios con el suelo rural, las plantas y las copas de los árboles. El segundo tipo de isla de calor corresponde con la que se encuentra bajo la superficie de una ciudad, ya que si existe una superficie caliente este se transmitirá hacia el subsuelo. El último tipo de isla de calor es el más tradicional y es el que existe en la atmósfera urbana, la cual se puede distinguir en dos tipos: la capa límite urbana y la capa de las copas urbanas (Stewart, 2011).

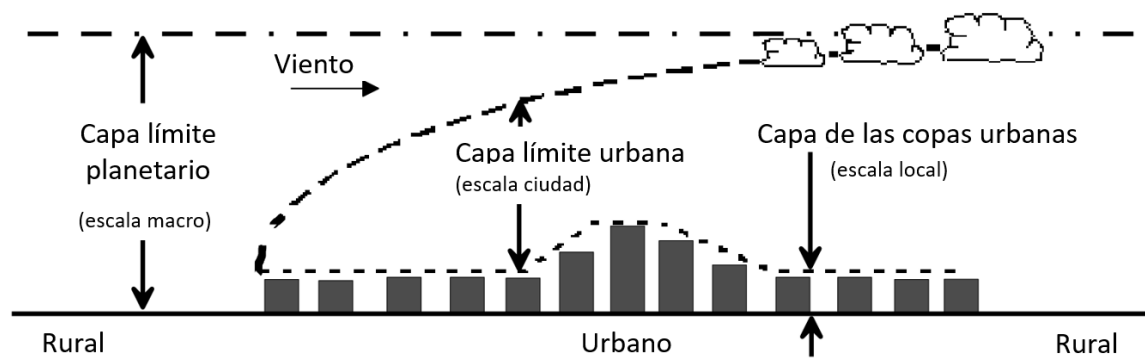


Fig. 1.2 Clasificación de las dos capas de la atmósfera urbana (modificado de Stewart, 2011).

La capa límite urbana es alterada por procesos locales y urbanos y es la parte de la capa del límite planetario cuyas características climáticas se ven afectadas por la ciudad. Se encuentra sobre la capa de las copas urbanas y puede llegar a tener un espesor de 1 km durante el día el cual se reduce durante la noche (Rivera Rivera, 2012; Stewart, 2011).

En la porción más somera de la atmósfera que se encuentra sobre la superficie del suelo pero por debajo de los techos de los edificios se encuentra la capa de las copas urbanas, esta capa se ve afectada por micro procesos que suceden entre las calles, los edificios y otras superficies de la ciudad (Stewart, 2011).

La formación de islas de calor se pueden ver intensificadas de acuerdo con las estaciones del año y las características de dichas estaciones en distintas ciudades alrededor del mundo, las islas de calor más intensas pueden llegar a suceder durante el invierno o verano de manera cíclica cada año (Martínez Martínez, 2014).

Causas

No existe una sola causa de las islas de calor, son muchos factores combinados los cuales causan el calentamiento de las ciudades: el material de la cobertura del suelo que suele ser artificial en las ciudades, la baja reflectancia solar o albedo fomentan el calentamiento solar ya que las superficies tienden a calentarse en relación con el entorno, la radiación solar que queda atrapada en las geometrías urbanas, el bajo flujo de aire ya que en el paisaje urbano el movimiento de aire está gobernado por el viento y las rutas asociadas a la distribución de los edificios el viento se puede ver afectado por las condiciones topográficas, las pocas áreas verdes ya que se pierde la evapotranspiración que es la evaporación y la transpiración de las plantas, así como la pérdida de sombra natural que reduce la radiación solar directa sobre la superficie, la falta de cuerpos de agua para regular la temperatura, las partículas contaminantes, la humedad, el calor emitido de las actividades humanas y algunas características físicas de la ciudad como su ubicación, el clima, sus características morfológicas, el tipo de vegetación y el tamaño de la ciudad (Barrera Alarcón et al., 2022; Hulley, 2012; Li, 2016; Rivera Rivera, 2012).

Tabla 1.1 Características de la ciudad que fomentan la formación de islas de calor (modificado de Li, 2016).

Características de la ciudad	Causantes que fomentan las islas de calor
Falta de vegetación	Reduce la evaporación
Uso de superficies impermeables	Reduce la evaporación
Baja reflectancia solar de los materiales urbanos	Aumenta la radiación
Geometrías urbanas que atrapan el calor	Aumenta la radiación
Geometrías urbanas que reducen la velocidad del viento	Reduce la convección
Mayor uso de energía	Aumenta el calor antropológico

Con el desarrollo y expansión de las áreas urbanas la mayor parte de la cobertura vegetal es reemplazada con materiales artificiales relativamente secos, oscuros, superficies pavimentadas y techos los cuales debido a sus propiedades térmicas y caloríficas absorben energía solar que eventualmente es liberada a la atmósfera en la tarde-noche. La radiación solar que no es absorbida por las superficies es reflejada sin embargo superficies oscuras y no reflejantes tienen un albedo (porcentaje de energía solar reflejada por la superficie) bajo de hasta 5%, lo cual provoca que se caliente la superficie como la atmósfera inmediata, (dado que la superficie se calienta y se enfría más rápido que el aire, la temperatura superficial más alta se observa al mediodía) lo cual contribuye a la formación de islas de calor urbano, en comparación los techos con colores claros y los materiales de techos fresco tienen un albedo de 65% o mayor (Hulley, 2012; Martínez Martínez, 2014; Medina-Fernández et al., 2023; Rivera Rivera, 2012).

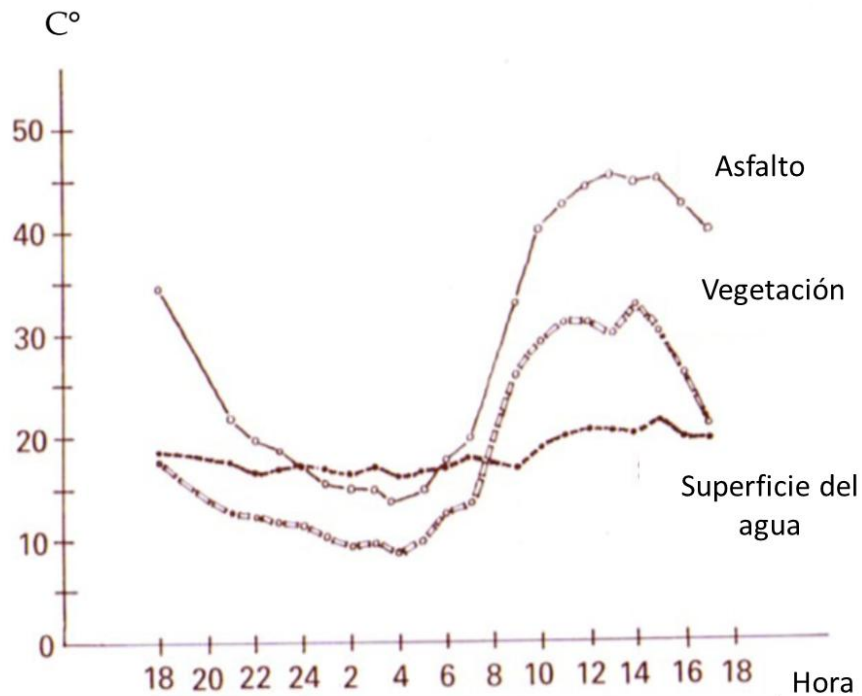


Fig. 1.3 Temperatura de la superficie de los materiales expuestos en un día (modificado de Rivera Rivera, 2012).

La radiación solar depende de la geometría urbana que se puede definir con la relación H/W donde la H es la altura de los edificios y la W es el espacio entre ellos. En las áreas planas la mayor parte de la radiación solar incidente es reflejada o emitida después de la absorción, conforme aumenta la densidad del área aumenta la relación H/W lo que significa que la radiación reflejada incide sobre otros edificios antes de ser absorbida por el suelo, en áreas con una alta relación H/W la radiación sufre múltiples reflexiones entre los edificios calentando las superficies y el aire que se encuentra atrapado entre los edificios. La reducción del factor de visión del cielo debido a las características geométricas de calles y edificios que obstruyen la visión del cielo impide la fácil liberación del calor por irradiación (Martínez Martínez, 2014; Rivera Rivera, 2012; Stewart, 2011).



Fig. 1.4 Vistas hemisféricas del cielo desde las afueras de la ciudad, calle residencial arbolada y centro de la ciudad (modificado de Stewart, 2011).

Durante el día y particularmente en días sin nubes, la temperatura del aire inmediatamente sobre una superficie caliente aumenta, sube y se mezcla con el aire de la atmósfera circundante. Durante la noche las superficies empiezan a enfriarse, pero comparado con áreas rurales cercanas el aire tiene una temperatura mayor. La densidad, centralización de edificios altos e infraestructuras relacionada y geometrías poco favorables para el flujo de aire pueden generar cañones urbanos que impiden la disipación de calor debido a baja velocidad del viento fomentando las islas de calor urbano, ya que la radiación solar rebota entre los edificios calentando el aire que se encuentra entre ellos, el 60% del calor se transfiere al volumen del aire del cañón el 30% es absorbido por los materiales del cañón y el 10% es consumido por la evaporación de las superficies (Hulley, 2012; Martínez Martínez, 2014; Rivera Rivera, 2012).

La presencia de montañas en la superficie terrestre detiene la difusión de aire y alteran la distribución normal de temperatura, la formación de islas de calor se ve favorecida y la ciudad se encuentra rodeada por montañas y aquí estás teniendo un efecto en la descripción del viento y la lluvia creando una mayor aceleración del viento en la parte superior y menor turbulencia en la parte inferior (Rivera Rivera, 2012).

Las superficies con vegetación contribuyen al enfriamiento y prevención de islas de calor de dos maneras muy importantes la primera es que proporcionan sombra que ayuda a reducir la temperatura de la superficie la segunda es que las plantas disipan calor al liberar vapor de agua a los alrededores en un proceso llamado evapotranspiración que ocurre cuando el sol calienta el agua dentro de la planta que posteriormente es expulsado por pequeños agujeros en la superficie de la planta, dado que el vapor de agua liberado había absorbido el calor el resultado de la evapotranspiración es el enfriamiento de la planta y sus alrededores (Hulley, 2012).

Al reemplazar la superficie natural por asfalto, pavimento, concreto o paredes y techos impermeables se disminuye la evaporación ya que esto provoca la rápida escorrentía de las aguas de lluvia impidiendo su almacenaje en la superficie del suelo (Martínez Martínez, 2014).

La falta de presencia de cuerpos de agua para moderar las temperaturas extremas fomenta las islas de calor, ya que un cuerpo de agua aumenta la temperatura mínima durante el invierno y disminuye temperatura la máxima durante el verano. La evaporación hace que el aire sea menos seco lo que es importante en regiones donde hay poco flujo de viento (Rivera Rivera, 2012).

El consumo y generación energético así como el calor emitido por las actividades humanas en general, los escapes de los autos, los aires acondicionados, los procesos de manufacturación, los procesos industriales y cualquier otra fuente de calor residual contribuyen a la formación de islas de calor urbano (Barrera Alarcón et al., 2022; Hulley, 2012)

La radiación que es reflejada por el suelo hacia la atmósfera puede verse obstaculizada por la presencia de partículas contaminantes en la atmósfera urbana, parte de la radiación es absorbida por esta capa sin embargo otra parte es reflejada de nuevo hacia el suelo lo que impide que las radiaciones escape a niveles atmosféricos superiores y sea disipada (Martínez Martínez, 2014).

Efectos

Aunque durante el invierno en ciudades frías en latitudes altas o con grandes elevaciones los efectos de las islas de calor pueden ser beneficiosos hay que prolongan la temporada de siembra y reducen la energía utilizada en calefacción, la realidad es que en la mayoría de las áreas urbanas estos efectos son vistos como un problema, ya que pueden afectar a el ambiente y la calidad de vida (Li, 2016).

Los efectos locales suelen ser mucho más severos que los efectos a una escala global esto debido a temperaturas más altas e impactos más directos sobre peatones, edificios y vehículos (Li, 2016).

Las islas del calor urbano disminuyen el confort térmico humano que es la temperatura ideal donde el cuerpo se encuentra en las mejores condiciones para realizar las actividades normales, la temperatura atmosférica ideal se encuentra entre 15.6°C y 24.4°C, siendo la mejor 19°C en el verano y 17°C en el invierno, con vientos bajos y una humedad relativa entre 40% y 70%. Las temperaturas altas también pueden disuadir a las personas de caminar o utilizar la bicicleta para viajes de corta distancia utilizando como alternativa los automóviles lo cual a largo plazo tiene un impacto en la salud de las personas y es perjudicial para la creación de una ciudad con métodos de transporte alternativo(Li, 2016; Rivera Rivera, 2012).

Además de la disminución del confort general las islas de calor afectan la salud humana al contribuir a problemas respiratorios, calambres por calor, agotamiento, golpes de calor no fatales, y muertes relacionadas con calor. Los niños, adultos mayores y aquellas personas con problemas de salud preexistentes o respiratorios, están particularmente expuestos ante estos eventos. Eventos de calor extremo así como los cambios de temperatura abruptos son particularmente peligrosos y pueden contribuir a las muertes prematuras (Li, 2016; Rivera Rivera, 2012).

Las islas de calor también pueden provocar un incremento en la utilización de energía utilizada para enfriar edificios en busca del confort de las personas, con valores tan altos como un aumento del 5% al 10% en la demanda de energía eléctrica para compensar el efecto de las islas de calor principalmente en áreas con una alta densidad como edificios de oficinas, industrias o desarrollos inmobiliarios con un exceso de habitantes. Al igual que un aumento en la energía necesaria para enfriar vehículos estacionados o en movimiento (Li, 2016; Rivera Rivera, 2012).

El aumento en la demanda de energía eléctrica se puede ver reflejado en un aumento en la contaminación del aire y los gases efecto invernadero ya que se requiere o la mayor cantidad de combustibles fósiles para la generación de dicha energía lo que genera gases contaminantes como dióxido de sulfuro monóxido de carbono y óxido de nitrógeno (NOx). Además del impacto relacionado con la energía las temperaturas altas aumentan la probabilidad de formación de ozono a nivel de suelo el cual es generado cuando NOx y compuestos volátiles orgánicos reaccionan en presencia del Sol y las altas temperaturas, los valores elevados de NOx están asociados con

enfermedades respiratorias graves y pueden aumentar su cantidad cuando la temperatura se eleva 3 °C (Hernández Godínez, 2019; Li, 2016; Rivera Rivera, 2012).

Las altas temperaturas en la superficie del pavimento pueden calentar el agua de lluvia desde los 21° hasta los 35 °C, esta agua puede llegar hasta los ríos, estanques y lagos dónde puede afectar todos los aspectos de la vida acuática específicamente el metabolismo y reproducción de muchas especies acuáticas llegando hasta ser mortal de algunas especies. Con el aumento de temperatura también se utiliza una mayor cantidad de agua por familia (Li, 2016; Rivera Rivera, 2012).

La durabilidad de los materiales puede verse afectada por las islas de calor urbanas dado que las altas temperaturas pueden provocar que algunos materiales como el pavimento se deformen o se fracturen (Li, 2016).

Áreas verdes/Infraestructura verde de la Ciudad de México

Áreas verdes

Globalmente las ciudades albergan más de la mitad de la población y aunque sólo ocupan el 3% del territorio mundial utilizan entre 60 y 80% de la energía global y el 75% de las emisiones de carbono del mundo son generadas por las ciudades. El concepto de áreas verdes urbanas surge de entender que estas pueden y deben ser de manejadas de manera integrada con el resto de la ciudad dado que de esta forma se pueden obtener beneficios sociales y ambientales más allá del uso recreativo o estético. Algunos de estos beneficios son las mejoras a la salud, el control de inundaciones, la reducción de contaminación del aire, la regulación del microclima, el incremento de biodiversidad, el turismo, la producción de alimentos, la reducción de desigualdad, la integración social y la disminución de los niveles de inseguridad (Núñez, 2021; Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2021)

La infraestructura verde o ecosistema urbano incluye todas aquellas áreas verdes urbanas y rurales de la ciudad como parques, plazas con jardines, bosques urbanos, campos deportivos, bordos, camellones, jardines comunitarios, áreas naturales protegidas y bosques naturales aunque son poco convencionales también son considerados los panteones y las azoteas verdes así mismo los lagos artificiales, lagunas de regulación, canales y jardines infiltrantes considerados espacios azules (Gestión Integral Forestal, 2020; López González et al., 2021b; Núñez, 2021).

La distribución de áreas verdes puede ser afectada por decisiones de la política pública dado que estas decisiones influyen en la cantidad, calidad, tamaño, diseño y distribución. Indirectamente estas decisiones determinan la población beneficiada por estas áreas y dado que se necesita una cierta cantidad de áreas verdes para sostener un ecosistema urbano, la Organización Mundial de la Salud recomienda como mínimo 9 m² por habitante, a lo cual la ONU tiene como parte del desarrollo sostenible la meta de que para el año 2030 exista una equidad en el acceso a los espacios públicos y áreas verdes, una meta adoptada por México en las agendas locales de los estados y municipio (Araiza-Olivares, 2022; López González et al., 2021a; Núñez, 2021).

Áreas verdes en la Ciudad de México

Desde la fundación de Ciudad de México el diseño de las áreas verdes, así como el manejo de la vegetación ha estado fuertemente influenciado por el medio geográfico y urbano, cuál desde la época colonial aparecieron plazas con espacios verdes como la Alameda Central, durante el porfiriato muchos parques y avenidas adoptan un estilo europeo y algunas plazas se convierten en jardines y parques. A comienzos del siglo XX las áreas verdes ocupaban el 2% de la superficie de la capital, porcentaje que aumentó hasta el 16% bajo el mando del ingeniero Miguel Ángel de Quevedo. La Ampliación Del Bosque de Chapultepec, la inauguración del bosque de Aragón y la integración del bosque de Tlalpan representan las últimas grandes áreas verdes en aparecer en la Ciudad de México (Núñez, 2021).

El gobierno de la Ciudad de México constantemente está trabajando para garantizar la mejor calidad de vida de sus habitantes tratando de llegar a una ciudad sustentable basada en la Ley del Sistema de Planeación del Desarrollo y la Ley de Cambio Climático de la Ciudad de México con el objetivo de mitigar el 83% de las emisiones de compuestos y gases de efecto invernadero para el año 2040 tomando como base las emisiones de 2016 (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2021).

El gobierno de la Ciudad de México durante las últimas dos décadas ha impulsado la generación de inventarios de áreas verdes urbanas los cuales incluyen la ubicación espacial, dimensiones, tipos de áreas verdes, composición y cantidad por habitante estos inventarios son generados a partir de imágenes de satélite y metodologías de percepción remota utilizando los sistemas de información geográfica como herramienta. Esto ha permitido tener un diagnóstico global de las áreas verdes con lo cual han existido avances en cuanto al diseño de políticas y evaluación de uno de los principales factores de la calidad ambiental de la ciudad (Núñez, 2021).

Aunque la OMS establece que el rango de áreas verdes por habitante este de 9 a 12m², en la Ciudad de México es aproximadamente 7.54 m², sin embargo, la distribución de estas áreas no es equitativa ya que dependiendo de la alcaldía puede ser desde 3 m² hasta 15 m² por habitante, situación que se busca remediar desde el 2019 mediante el programa sembrando parques que busca recuperar espacios para que las personas puedan disfrutar de la infraestructura verde. (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2019, 2021)

En la Ciudad de México uno de los principales factores que contribuyen a la pérdida de áreas verdes es que estos pasan a ser áreas de usos urbanos un gran porcentaje de estas pérdidas son las áreas verdes urbanas privadas o informales que no se encuentran bajo un manejo adecuado, a pesar de la pérdida general de áreas verdes se observa un aumento en la cantidad de áreas gestionadas por las autoridades lo cual es un reflejo que el esfuerzo el gobierno para mejorar la infraestructura verde de la ciudad (Medina-Fernández et al., 2023; Núñez, 2021)

Estado del arte

Internacional

Las primeras referencias de un microclima urbano es decir de una ciudad caliente y un campo fresco son del siglo XVII, los cuales tenían un enfoque hacia la salud más que un enfoque científico, ya que se creía que el aire caliente y sucio de las ciudades aceleraba el proceso de dispersión de enfermedades, en 1806 Luke Howard realizó un estudio mayor del efecto de las islas de calor en Londres el cual publicó en 1833 con el nombre “The Climate of London”, dicho estudio consistía en la obtención de la temperatura diaria en el área y las zonas rurales campo alrededor de Londres (López González et al., 2021b; Stewart, 2011).

Durante 1850, hasta 1950 nuevas investigaciones como las hechas en Londres comenzaron a ser realizadas en otros países los efectos de las olas de calor eran obtenidos por la simple comparación entre la temperaturas mínimas y promedio de las ciudades y el campo: Múnich (Wittwer, 1860), Berlín (Perlewitz, 1890), Paris (Hann, 1895), Viena (Topolansky, 1924), and Moscú (Bogolepow, 1928). En la ciudad de México Moreno (1899) comparó la temperatura mínima del palacio nacional con una observada a 6 km al oeste de la ciudad (Stewart, 2011).

La era moderna acerca de investigaciones sobre islas de calor comenzó a partir de 1950 dado que hubo un cambio en la investigación específicamente en la metodología entendimiento del concepto lo que permitió un mejor entendimiento del proceso y sus efectos, dichos efectos han causado interés en la comunidad científica principalmente en cuestiones ambientales y de clima urbano dando como resultado una gran cantidad de información publicada. Algunos de los cuales se encuentran enunciados en las siguientes páginas (Córdova, 2011; Stewart, 2011).

Dentro de las publicaciones se pueden clasificar de acuerdo con el propósito de investigación y se generaron tres clasificaciones que resultan pertinente para este trabajo: análisis de factores y causas, análisis espacio temporales y análisis de estrategias de mitigación

Análisis de factores y causas

Para poder comprender de mejor manera las islas de calor o las islas de calor urbano es necesario entender cuáles son sus principales causantes, así como cuáles factores de las ciudades pueden llegar facilitar su aparición o aumentar el efecto que pudiesen llegar a tener. También importante en este apartado es entender cuáles pueden llegar a ser sus efectos en diferentes rubros como economía y salud.

Impactos de las islas térmicas o islas de calor urbano, en el ambiente y la salud humana. Análisis estacional comparativo: caracas, octubre 2009-marzo 2010. Utilizando la banda térmica del sensor LANDSAT7ETM+ se observaron variaciones en los patrones de la temperatura superficial urbana y se pudo determinar la intensidad y extensión de las anomalías térmicas, resaltando la diferencia entre temperatura superficial del área urbana y la zona periurbana (Córdova, 2011).

Evaluación de los efectos de enfriamiento de la infraestructura verde: una revisión sistemática de métodos, indicadores y fuentes de datos. Una revisión sistemática de los estudios que cuantifican e informan sobre la relación entre las características de la vegetación y su efecto sobre el confort térmico humano, la temperatura del aire y la temperatura de la superficie (Bartesaghi Koc et al., 2018).

Evidencia de los impactos de las islas de calor urbanas en la duración de la temporada de crecimiento de la vegetación en una ciudad tropical. Estimación de la duración de la temporada de crecimiento de la vegetación y la temperatura superficial terrestre a partir de imágenes satelitales MODIS (2013 a 2015) y caracterizando la forma urbana a partir de la clasificación de la zona climática local (Kabano et al., 2021).

Análisis espacio temporales

Dado que este trabajo se enfocará en la Ciudad de México la cual es una ciudad de gran tamaño que se encuentra en constante cambio, es necesario entender cómo la dinámica de crecimiento de las ciudades modifica la superficie y el cambio de uso de suelo a lo largo del tiempo, dado que esto representa uno de los factores más importantes al momento de evaluar las islas de calor.

El uso de información NOAA y AVHRRD para evaluación del efecto de isla de calor urbana. Comparación realizada entre la temperatura mínima del aire urbano y rural a partir del índice de vegetación y la temperatura de la superficie, con el propósito de evaluar el uso de información satelital para la identificar la influencia del ambiente urbano sobre la temperatura mínima observada. También se evaluó la consistencia temporal de la información con datos diarios, semanales, 2 semanas y mensuales (Gallo et al., 1993).

Estimación de la relación de la temperatura de la superficie-abundancia de vegetación para el estudio de islas de calor urbano. Utilizando el LST Y NDVI se busca la interacción entre la dinámica térmica y de la vegetación en un contexto de diferentes tipos de cobertura terrestre que producen variaciones en la radiación espectral y la textura del LST (Weng et al., 2004)

Patrones y factores de crecimiento espacial de la ciudad de Santiago de Chile y sus efectos en la generación de islas de calor urbanas de superficie. este trabajo utiliza una serie de imágenes satelitales LANDSAT de 1975 a 2004 para identificar el cambio de uso de suelo de áreas agrícolas y vegetación que han sido ocupadas por usos urbanos, Enfocado a las relaciones que tienen el crecimiento urbano la temperatura superficial y variables geográficas tanto naturales como sociales (Romero, 2004).

Isla de calor y cambios espacio temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá. Se evaluaron los cambios de temperatura media, mínima y máxima ocurridos en la Ciudad de Bogotá en un periodo de 40 años identificando una isla de calor que se extiende por la mayor parte de la ciudad y periodos de aumento y disminución de la temperatura (Angel et al., 2010).

Estudio espacial del ambiente térmico en la ciudad Lanzhou, basado en percepción remota y SIG. El trabajo está enfocado al ambiente térmico y como la planeación urbana favorece un desarrollo urbano sustentable y mejora la calidad humana, se generó un mapa térmico a partir de los datos de radiación de Landsat TM que posteriormente se dividió en cinco niveles (Wangnaiang, 2006; Rivera Rivera, 2012).

Aplicación de percepción remota térmica para el estudio de la distribución de la temperatura superficial de la ciudad Ho Chi Minh, utilizando imágenes satelitales Landsat y Aster. Se busca determinar la temperatura superficial de las zonas urbanas ya que este tipo de imágenes son adecuados para el estudio de procesos térmicos en áreas urbanas, obteniendo como resultado un sesgo de 2° en comparación con las mediciones in situ (Van, Trung & Lan, 2009; Rivera Rivera, 2012).

Estudio de la isla de calor de la ciudad de Alicante. Utilizando el método de transectos se realizó la toma de temperatura durante 10 días identificando tres islas de calor en la ciudad (Martínez Martínez, 2014).

Identificación de islas de calor en la ciudad de Lima metropolitana utilizando imágenes del satélite LANDSAT 5TM. Mediante el uso de imágenes de satélite Landsat 5 TM se pudo obtener la temperatura de la superficie e identificar las islas de calor para 6 fechas desde 2008 a 2011 (Soberón Forsberg & Obregón Párraga, 2016).

Análisis de islas de calor por medio de imágenes satelitales y sistemas de información geográficos en el área urbana de la sabana de Bogotá. se utilizaron imágenes satelitales LANDSAT 8 para ser comparadas con datos de temperatura de estaciones meteorológicas para la delimitación de islas de calor urbano (Aragón et al., 2020).

Caracterización de las islas de calor urbana en el campus de la UAM por medio de teledetección: caracterización de la isla de calor urbana del campus de la Universidad Autónoma de Madrid y cómo es afectada por la isla de calor urbana de la ciudad, utilizando imágenes satelitales Sentinel-2, Landsat 8 e imágenes DESIREX (Aragoneses de la Rubia, 2020).

Análisis de estrategias de mitigación

Como este trabajo evaluará la capacidad de enfriamiento de las áreas verdes Es necesario comprender el impacto que tiene para mitigar las islas de calor urbano

Evaluación de la potencial mitigación de las islas de calor urbanas mediante el reverdecimiento de los estacionamientos. A partir de la relación entre la temperatura de la superficie y el uso de suelo en diferentes temporadas, se evaluó cuánto disminuyó las temperaturas superficiales suponiendo un aumento en la cobertura vegetal de los estacionamientos (Onishi et al., 2010).

Efectos positivos de la vegetación: isla de calor urbano y techos verdes. Este trabajo busca evaluar los efectos positivos de la vegetación tanto en una escala urbana como una escala de un edificio,

monitoreando la temperatura entre edificios en las áreas con más y menor vegetación. (Susca et al., 2011)

Análisis climatológico del efecto de mitigación de la vegetación en las islas de calor urbanas en Milán, Italia. Análisis de las islas de calor urbano de Milán, a partir de un modelo de balance energético aplicado a un parque urbano utilizando estaciones meteorológicas, uso de suelo, morfología urbana, actividades humanas e hidrología del suelo (Mariani et al., 2016).

Estudiar la vegetación como estrategia urbana para mitigar las islas de calor urbano en la megaciudad de el Cairo. Investigar los efectos de la vegetación en la mitigación de islas de calor urbano basado en mediciones de campo realizadas en espacios adyacentes y no adyacentes a áreas verdes (AbdElfattah AboElata, 2017).

Estimación de la capacidad de enfriamiento de las infraestructuras verdes para apoyar la planeación urbana. El objetivo de este estudio es proponer un enfoque para estimar la capacidad de enfriamiento proporcionada por las infraestructuras urbanas verdes con el fin de proporcionar información útil para la planeación urbana (Zardo et al., 2017).

Mitigación de la isla de calor urbano en una zona residencial de Teherán: investigando el papel de la vegetación, los materiales y la orientación de los edificios. Este trabajo evaluó las diferentes estrategias para la mitigación de las islas de calor urbano para mejorar las condiciones de confort térmico humano de la ciudad de Teherán tomando en cuenta los efectos de la vegetación urbana, las superficies de alto albedo y la orientación de los edificios (Farhadi et al., 2019).

¿Qué parámetros de diseño urbano proporcionan ciudades más resistentes al clima? Una Aplicación del modelo InVEST de refrigeración urbana en la ciudad de Milán comparando morfologías históricas de planificación. Este trabajo investiga como la evolución de los servicios ecosistémicos puede apoyar a la definición de parámetros de diseño urbano que influyan capacidad de implemento de las ciudades. modelando la capacidad de enfriamiento de la ciudad de Milán utilizando el software InVEST (Ronchi et al., 2020).

Evaluación de la capacidad de mitigación del calor de las áreas verdes urbanas con el uso del modelo de enfriamiento urbano InVEST, verificado con datos de temperatura de la superficie terrestre durante el día. Utilización del modelo InVest, utilizando parámetros accesibles asignados a un mapa de cobertura terrestre para producir un índice de mitigación del calor (Zawadzka et al., 2021).

Cuantificación de la mitigación del calor por áreas verdes urbanas utilizando el modelo InVEST: un análisis del escenario de la ciudad de Nagpur, India. Cuantificación de la mitigación del calor por áreas verdes urbanas utilizando el modelo InVEST, mediante una valoración integrada de los servicios ecosistémicos y compensaciones para escenarios presentes y futuros de la ciudad de Nagpur, que se encuentra en una zona afectada por las olas de calor (Kadaverugu et al., 2021).

Mapeo de los beneficios de la naturaleza en las ciudades con el software InVEST: Trabajo con un enfoque para apoyar la ecologización de las ciudades mediante la cuantificación y mapeo de los diversos beneficios de la infraestructura verde para el presente y el futuro, utilizando el software InVEST para calcular métricas biofísicas y socioeconómicas relevantes para una variedad de decisiones (Hamel et al., 2021).

El impacto de la arborización como estrategia de mitigación de la isla de calor urbana en el Caribe Colombiano: en este trabajo se evaluó la arborización como estrategia de mitigación de la isla de calor en Barranquilla, Colombia realizando simulaciones computacionales para comparar diferentes opciones de sombra vegetal para los años 2020 y 2050 (Cristina et al., 2023).

México

Análisis de factores y causas

Una revisión sobre la isla de calor urbana y sus particulares en zonas desérticas de México: Una investigación bibliográfica de la última década para identificar los impactos de las islas de calor pueden tener en la ciudad, los habitantes, el medio ambiente y el planeta en general en ciudades desérticas así como la dificultad de las estrategias de mitigación (Marincic, 2022).

Factores de influencia para formación de islas de calor en la zona metropolitana de Querétaro: Análisis de los factores que inciden en la formación de islas de calor urbanas durante los últimos 10 años, mediante la caracterización económica, social y socio-ambiental (Reyes-Escobedo & Aguiluz-León, 2023).

Análisis espacio temporales

Posible impacto de la urbanización en el clima térmico de algunas ciudades grandes de México. En este trabajo se examinan los cambios de temperatura ocurridos a finales del siglo XX utilizando las medias de temperatura mensual para una docena de estaciones disponibles en el país (Jáuregui, 2005).

Detección de la isla de calor urbana en Mexicali, Baja California, México y su relación con el uso del suelo. Se analizan las islas de calor urbano y su relación con el uso del suelo mediante la toma de temperatura del aire en el lugar y el uso de imágenes térmicas de satélite NOAA-AVHRR y Landsat (García-Cueto et al., 2007).

Isla de calor en Toluca, México. Sí se notifican los espacios con calor más intenso provocados por la infraestructura urbana utilizando los valores de temperatura de un día de invierno y uno de verano a partir de los datos de las estaciones de la red automática de monitoreo ambiental (RAMA) (Morales Méndez et al., 2007).

Análisis de estrategias de mitigación

Cobertura vegetal y la distribución de islas de calor/oasis urbanos en Hermosillo Sonora. Mediante el uso de sistemas de información geográfica y datos de teledetección remota se busca conocer

la influencia del porcentaje de cobertura vegetal en la temperatura superficial del suelo (López González et al., 2021b).

Mitigación y adaptación al efecto de la isla fue calor urbano de clima cálido seco. El caso de Hermosillo Sonora: un trabajo comparativo entre información meteorológica y satelital con el objetivo de identificar las causas de las islas de calor, sus efectos en el ambiente y la salud y proponer y validar estrategias de mitigación (Mercado, 2022).

Vigencia de la detección de las islas de calor urbana mediante recorridos: dos ejemplos en el oriente de México: El trabajo recupera datos de temperatura atmosférica en dos campañas de medición mediante trayectos vehiculares en el estado de Veracruz (Méndez-Pérez et al., 2023).

Estimación de islas de calor urbanas en la ciudad de Uruapan, Michoacán, México: El objetivo del trabajo fue determinar las islas de calor urbanas mediante el uso de registros de temperatura máxima de estaciones meteorológicas de 1963 a 1998 e imágenes satelitales Landsat 8 de 2013 a 2021 (Manzanilla Quiñones, 2023).

Ciudad de México

Variaciones estacionales de la isla de calor urbana en la superficie y cerca de la superficie y reducción por vegetación urbana en la ciudad de México. Este trabajo examina las variaciones estacionales de las islas de calor utilizando imágenes de resolución moderada de espectro radiómetro (MODIS) y observaciones meteorológicas de la superficie utilizando el modelo de Weather Research and Forecasting (Cui & De Foy, 2012).

La isla de calor urbana y la vegetación arbórea. Este artículo habla brevemente de las características de las islas de calor urbano en la zona metropolitana de la Ciudad de México así como el impacto observado en los parques urbanos que tiene la vegetación urbana para modificar el microclima de la ciudad proponiendo como mitigación la colocación de vegetación urbana en puntos estratégicos (Barradas, 2013).

The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model. Se generó un modelo fenomenológico basado en el balance energético para soportar teóricamente la mitigación de las islas de calor en la Ciudad de México mediante el aumento de la cobertura de árboles los cuales modifican el flujo de calor y la temperatura del aire (Ballinas & Barradas, 2016).

Caracterización de los efectos de la isla de calor en la delegación Venustiano Carranza, Ciudad de México: Un trabajo enfocado a la identificación de islas de calor, así como sus causantes y sus efectos en la población (Hernández Godínez, 2019).

Vulnerabilidad y riesgo climático. Los retos de la Ciudad de México hacia el primer tercio del siglo XXI: Artículo con el objetivo de aportar evidencias de las condiciones de vulnerabilidad por

cuestiones climáticas que afectan a la población de la Ciudad de México en especial aquellas relacionadas con las islas de calor y otros eventos hidrometeorológicos (Graizbord et al., 2024).

La Isla de calor en la Ciudad de México: un análisis decadal (1952-2010): Se analizó el comportamiento de la isla de calor en la Ciudad de México de 1950 a 2010 basado en datos climatológicos de la temperatura media por década (Araiza-Olivares, 2022).

Dinámica espacio temporal de la isla de calor urbana en la Ciudad de México: El trabajo busca caracterizar la dinámica de la isla de calor urbano de la ciudad de México y del área urbanizada colindante del Estado de México en el tiempo y espacio (Larena, 2022).

Capítulo 2 Métodos

Área de estudio

Para la realización de este trabajo se decidió trabajar con la Ciudad de México ya que es una de las ciudades más grandes del mundo y presenta una gran variedad de usos de suelo en un área pequeña y el porcentaje de cada tipo de suelo puede variar ampliamente dependiendo de la región que se esté observando.

La CDMX es el núcleo del área metropolitana más grande del país y tiene un papel central y de liderazgo en los ámbitos financieros, económicos, empresariales, industriales, académicos, sociales, culturales, turísticos, ambientales, y políticos (Araiza-Olivares, 2022; Larena, 2020; Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2021; Soto Montes de Oca et al., 2009). Habitan 9,209,944 personas basado en los datos del Censo De Población Y Vivienda 2020, que representa un crecimiento de 0.4 comparado con los datos de 2010 es decir 358,864 residentes. La densidad de población de la Ciudad de México es la más alta del país con 6,163.3 habitantes por kilómetro cuadrado, existen 2,756,319 viviendas particulares habitadas lo que representa un crecimiento promedio anual de 1.2% en comparación a las 2,453,031 viviendas en el 2010 (INEGI, 2021).

La Ciudad de México tiene una altura de 2240 m sobre el nivel del mar y una superficie de 1485 km², dicha superficie ha cambiado a lo largo del tiempo. Desde su fundación en 1521 la transformación del medio geográfico y urbano ha influido directamente en el diseño de las áreas verdes, así como el manejo de la vegetación natural de la ciudad. A inicios del siglo 20, sólo el 2% de la superficie de la capital era considerada áreas verdes una década después el ingeniero Miguel Ángel de Quevedo aumentó el porcentaje de áreas verdes a 16%. Más recientemente la Ampliación Del Bosque de Chapultepec, la creación del Bosque de Aragón y la integración del Bosque de Tlalpan representan el último impulso de grandes áreas verdes (INEGI, 2021; Núñez, 2021).

Durante la década de los 70 el Distrito Federal aumenta sus áreas verdes con la aparición de ejes viales y unidades habitacionales con jardineras. En 1985 el Atlas de la Ciudad de México reporta que hay 2.3 m² de área verde por habitante considerando jardines, parques, glorietas y camellones (Núñez, 2021).

A principios del siglo XXI el Gobierno del Distrito Federal a través de la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA), implementa diversas estrategias para conocer, normar y desarrollar las áreas verdes urbanas. Eventualmente creando una regionalización para la Ciudad de México, conformada por 8 territorios con características, elementos, composición, distribución de áreas verdes y problemáticas socioambientales similares llamadas Regiones de Infraestructura Verde. (Gestión Integral Forestal, 2020; Núñez, 2021).

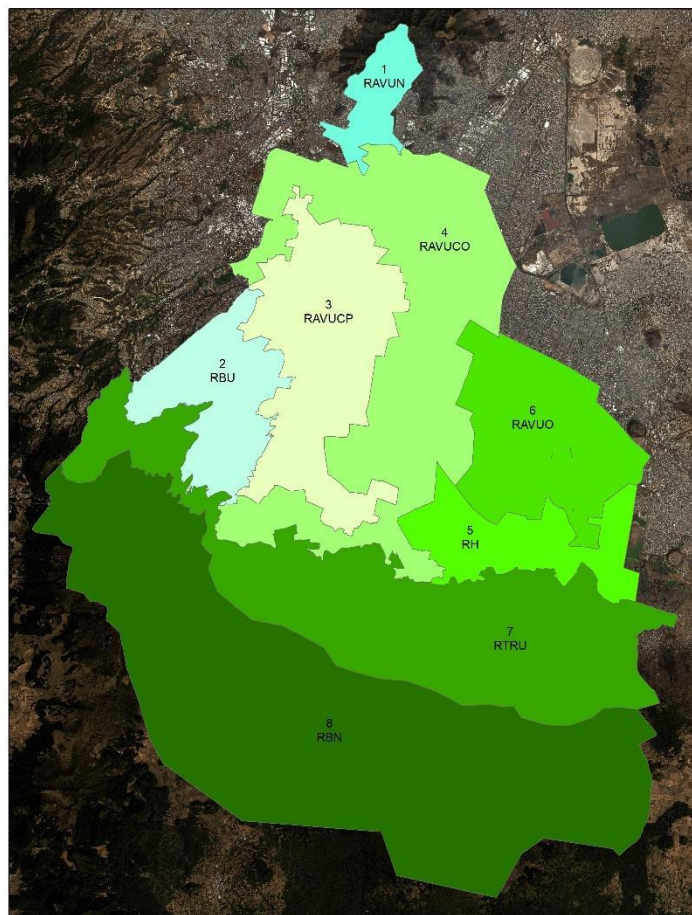


Fig. 2.1 Las 8 regiones de infraestructura verde de la Ciudad de México. 1 Región de Áreas Verdes Urbanas Norte, 2 Región de Barrancas Urbanas, 3 Región de Áreas Verdes Urbanas Centro Poniente, 4 Región De Áreas Verdes Urbanas Centro Oriente, 5 Región de Humedales, 6 Región de Áreas Verdes Urbanas Oriente, 7 Región de Transición Rural-urbana y 8 Región de Bosques Naturales. (Elaboración propia)

Tomando en cuenta las 8 regiones de Infraestructura Verde se optó por enfocar el trabajo a la Región de Áreas Verdes Urbanas Centro Poniente (RAVUCP) ya que se trata de una región en el

centro de la Ciudad de México con un porcentaje alto de urbanización y presenta una variedad de áreas verdes importantes y de interés para el trabajo:

- grandes áreas verdes: el Bosque de Chapultepec y Ciudad Universitaria
- parques urbanos: el Parque México, la Alameda Central, Parque España
- avenidas con edificios altos: Avenida Insurgentes y Avenida Reforma
- áreas con una gran concentración de edificios, pero una menor cantidad de vegetación: el zócalo
- cuerpos de agua: el lago de Chapultepec



Fig. 2.2 Región de Áreas Verdes Urbanas Centro Poniente (RAVUCP) con las áreas verdes de la CDMX. (Elaboración propia)

La (RAVUCP) tiene una superficie de 15,034.5 hectáreas conformadas por la parte norte de la alcaldía Tlalpán, poniente de la alcaldía Coyoacán, oriente de la alcaldía Cuajimalpa, sur de la alcaldía Azcapotzalco y casi la totalidad de las alcaldías Benito Juárez, Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo. La región tiene una temperatura media anual entre 14 y 16 °C con precipitaciones medias anuales de entre 600 y 800 mm (Gestión Integral Forestal, 2020).

Solo hay 3 categorías de uso de suelo y vegetación: bosque cultivado, matorral Sarcocaulis y urbano construido. Existen 3073 polígonos de áreas verdes urbanos que cubren una superficie de

1524.6 hectáreas distribuidas en 10 categorías, lo cual corresponde a 9.5 m² de área verde por habitante (Gestión Integral Forestal, 2020).

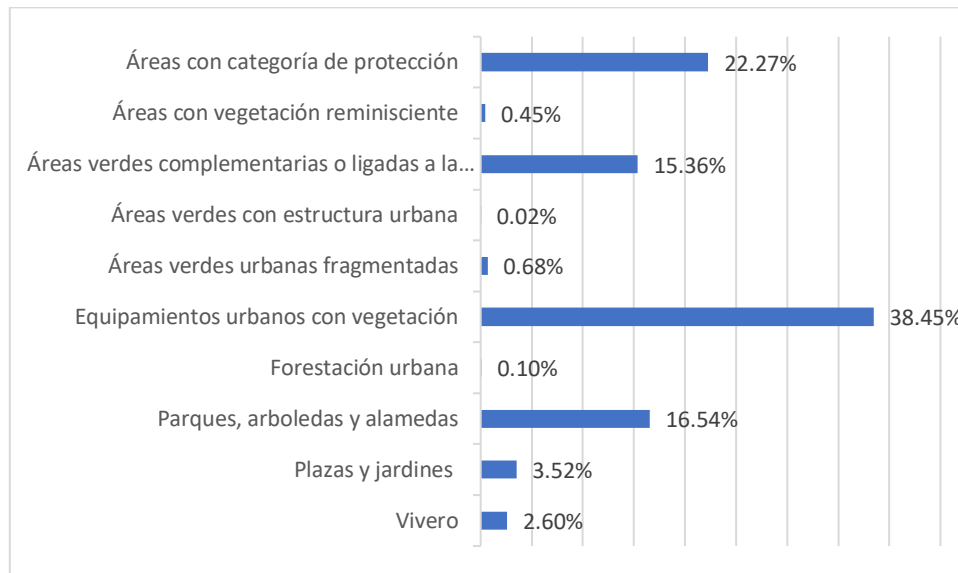


Fig. 2.3 Categorías y distribución relativa de las áreas verdes en la RAVUCP (Gestión Integral Forestal, 2020).

Crecimiento urbano

La Ciudad de México concentra el 7.3% de la población total del país es el segundo estado con mayor número de habitantes después del Estado de México que concentra el 13.4%, la población de la Ciudad de México está en constante crecimiento debido principalmente a las oportunidades laborales y la mejor calidad de vida que se encuentran en la ciudad también se debe al aumento de viviendas en ciertas áreas debido a la renovación de la zona lo que atrae a nuevos residentes con un mayor poder adquisitivo que es el fenómeno de gentrificación. Este crecimiento poblacional implica un crecimiento en el número de viviendas en la ciudad, en el año 2000 había 2,131,410 viviendas en el 2010 2,453,031 y según datos del último censo de población en el 2020 hay 2,756,319 viviendas particulares habitadas lo que implica una tasa de crecimiento promedio anual de 1.4% del 2000 al 2010 y 1.2% del 2010 al 2020 (Arku, 2021; INEGI, 2021).

Del 2010 al 2020 las alcaldías con una mayor tasa de crecimiento promedio anual de viviendas particulares habitadas son: Cuajimalpa de Morelos con 2.4%, Benito Juárez con 2.3% y milpa alta con 2.1%. En contraste Iztapalapa, La Magdalena Contreras, Gustavo A. Madero y Coyoacán tienen una tasa menor a 1%, este crecimiento es tanto en la periferia de la ciudad cómo en el relleno de áreas despobladas dentro de la ciudad (INEGI, 2021; Janoschka & Sequera, 2014).

Método

Para el análisis del cambio en la capacidad de mitigación de las áreas verdes y arbolado urbano. Se realizaron 3 etapas: 1) Estimación de áreas verdes y arbolado urbano 2016, 2020 y 2024, 2) estimación de islas de calor, y 3) cálculo de la capacidad de enfriamiento urbano 2016, 2020 y 2024 (Fig. 2.4).

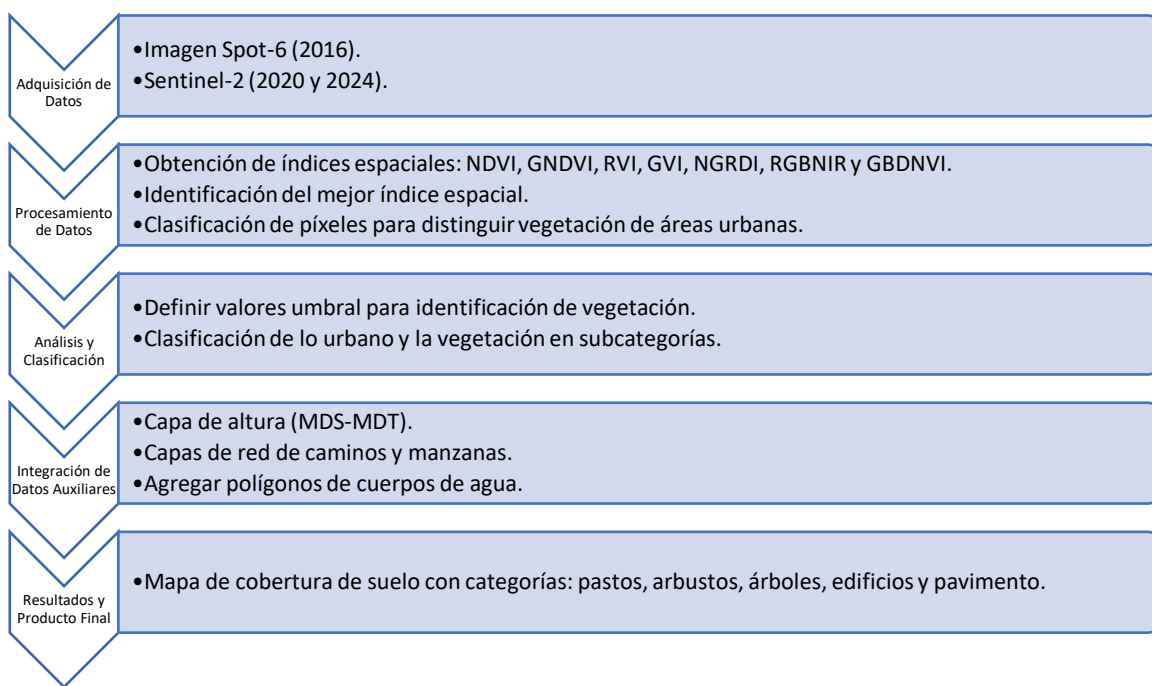


Fig. 2.4 Diagrama metodológico que ilustra el proceso para obtener la cobertura de suelo (Elaboración propia)

Estimación de áreas verdes y arbolado urbano 2016, 2020 y 2024

A partir de imágenes satelitales y de la combinación de bandas para formar índices espectrales fue posible realizar una clasificación de la cobertura de la superficie, para distinguir la vegetación de las áreas urbanas, y así comparar distintas fechas para obtener las áreas donde los píxeles de vegetación han pasado a ser urbanos. También es importante tomar en cuenta que no sólo el cambio de cobertura de no urbano a urbano está presente en esta región, dado que es una región con una gran cantidad de parques y de otras infraestructuras verdes las cuales se encuentran bajo los programas de infraestructura verde de la Ciudad de México fue necesario evaluar si existió el cambio de urbano a no urbano cuando ya sea por aparición de nueva infraestructuras verdes o las áreas verdes existentes aumentaron en tamaño mediante proyectos como los de reforestación o mejoramiento.

Se utilizaron una imagen Spot-6 (2016) y dos imágenes Sentinel-2 (2020 y 2024) para estimar las áreas verdes y arbolado urbano de la RAVUCP. Primero, para segmentar la vegetación de lo urbano a través del método de clasificación de máxima verosimilitud (clasificación supervisada).

Lo primero fue identificar cuál de los distintos índices de vegetación nos permite identificar de una manera más sencilla la vegetación en la superficie, los índices analizados fueron: NDVI, GNDVI, RVI, GVI, NGRDI, RGBNIR y GBDNVI.

Tabla 2.2 Tabla con los índices de vegetación y su uso por el cual son considerados para esta metodología (Han et al., 2022; Hashim et al., 2019).

Índice	Aplicación o uso
NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)	Utilizado para monitorear la salud de la vegetación y su crecimiento
GNDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde)	Se utiliza para evaluar el estrés hídrico y el estado nutricional de los cultivos
RVI (Índice de Vegetación Relativa)	Utilizados para valorar la salud general de la vegetación
GVI (Índice de Vegetación Verde)	Sirve para identificar áreas con vegetación densa y saludable
NGRDI (Índice de Diferencia de Verde-Rojo Normalizado)	Se usa para monitorear cambios en la vegetación
RGBNIR (Índice RGB + Infrarrojo Cercano)	Genera un falso color para identificar vegetación, agua y suelo
GBNDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde-Azul)	Para determinar áreas de vegetación donde la banda azul es mas útil

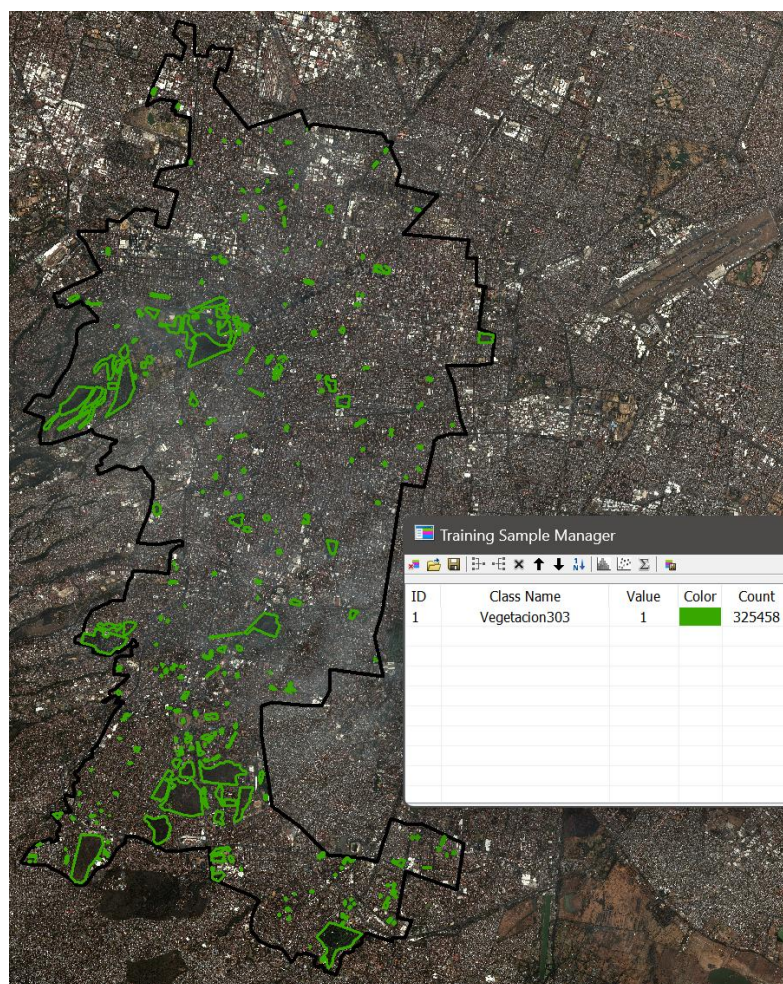


Fig. 2.5 Polígonos de calibración para la clasificación de máxima verosimilitud. (Elaboración propia)

Para realizar esta clasificación se emplearon 303 polígonos de calibración que correspondían a áreas de vegetación, que posteriormente fueron utilizados con los distintos índices para determinar que índice proporciona la mejor clasificación de la vegetación.

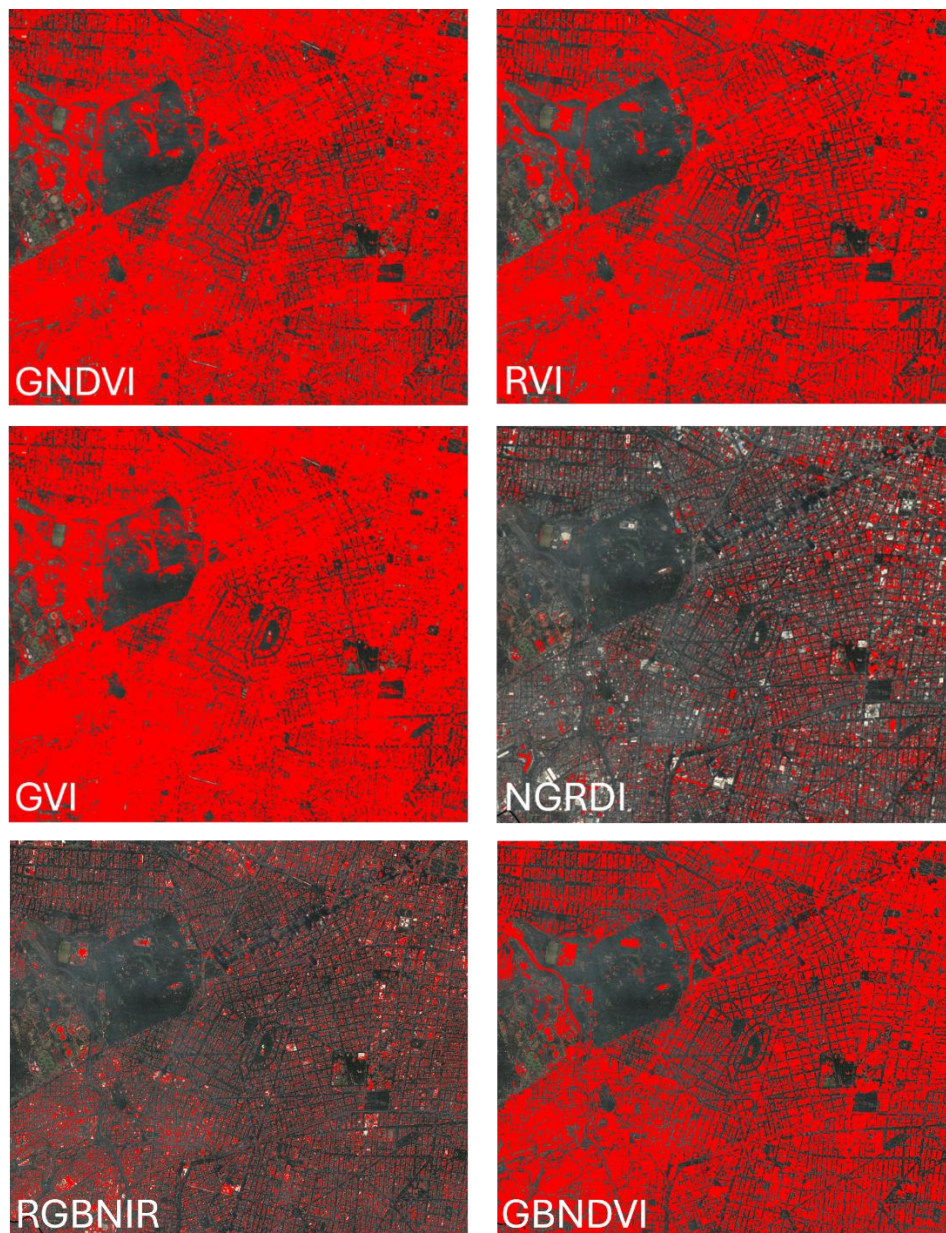
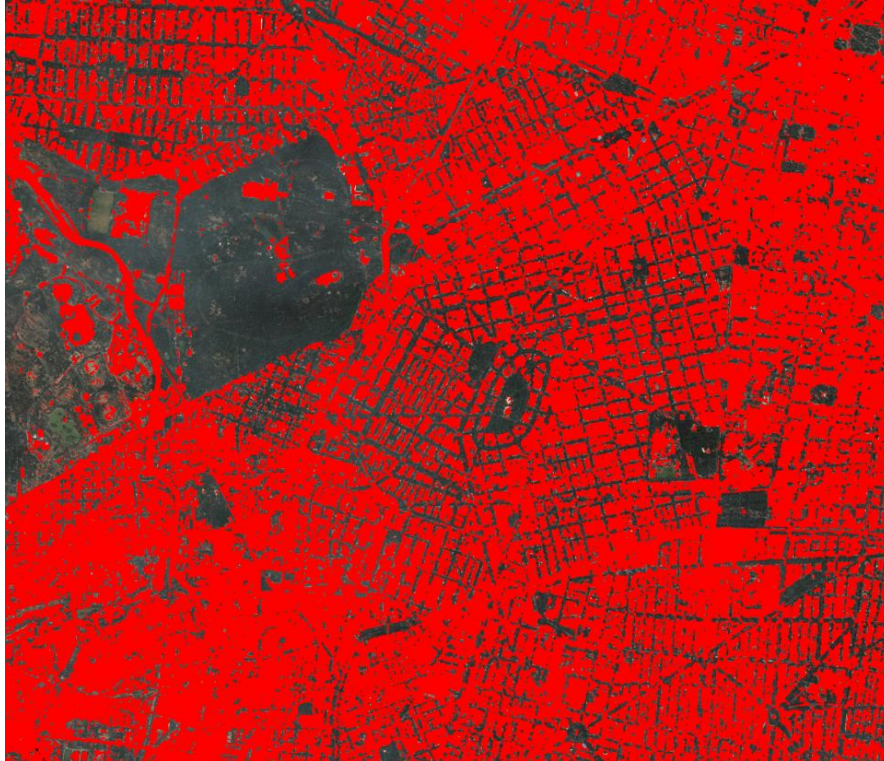


Fig. 2.6 Resultados obtenidos a partir de las pruebas para determinar cuál de los índices identifica mejor la vegetación (el color rojo corresponde con lo urbano). (Elaboración propia)

Aunque algunos de los índices mostraron errores importantes como el NGRDI y el RGBNIR que no distinguieron de manera correcta la vegetación causando una sobreestimación (pocas áreas rojas en la fig.2.6). En cuanto a la clasificación a partir de: GNDVI, RVI y GVI la clasificación no identifica bien la vegetación causando una subestimación, los dos índices que realizaron una mejor identificación de vegetación son el GBNDVI y el NDVI.

Los resultados de ambos índices son muy similares, pero existe una diferencia visible al momento de delimitar las manzanas. El GBNDVI delimita mejor la parte de vegetación correspondiente a los árboles que se encuentra en las calles por lo cual se aprecia una mejor delimitación de las manzanas, sin embargo, dentro de las manzanas no clasifica adecuadamente la parte urbana, en

el caso de NDVI existe una menor delimitación de la frontera de la manzana, pero toda la parte interna de la manzana corresponde a urbano. Dado que la información de la clasificación de urbano y vegetación se combinó con otras variables el índice que se decidió utilizar fue el NDVI con lo cual la delimitación de las manzanas es mejor.



*Fig. 2.7 Resultados obtenidos a partir de las pruebas para determinar cuál de los índices identifica mejor la vegetación.
(Elaboración propia)*

Una vez obtenidas las clasificaciones principales, lo urbano se separó en subcategorías, de edificios y pavimento, para lo cual se utilizaron dos capas auxiliares, las manzanas y la red de caminos de la ciudad.

Para la vegetación, se realizó la combinación con la capa de elevaciones generado a partir de la resta del Modelo Digital de Superficie (MDS) menos el Modelo Digital del Terreno (MDT), obtenidos a partir de los Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m de INEGI, con lo cual se clasificó la vegetación en por su altura y también sirvió para ayudar a diferenciar pavimento de edificios ya que los puentes y los túneles podían generar información errónea al momento de realizar la distinción.

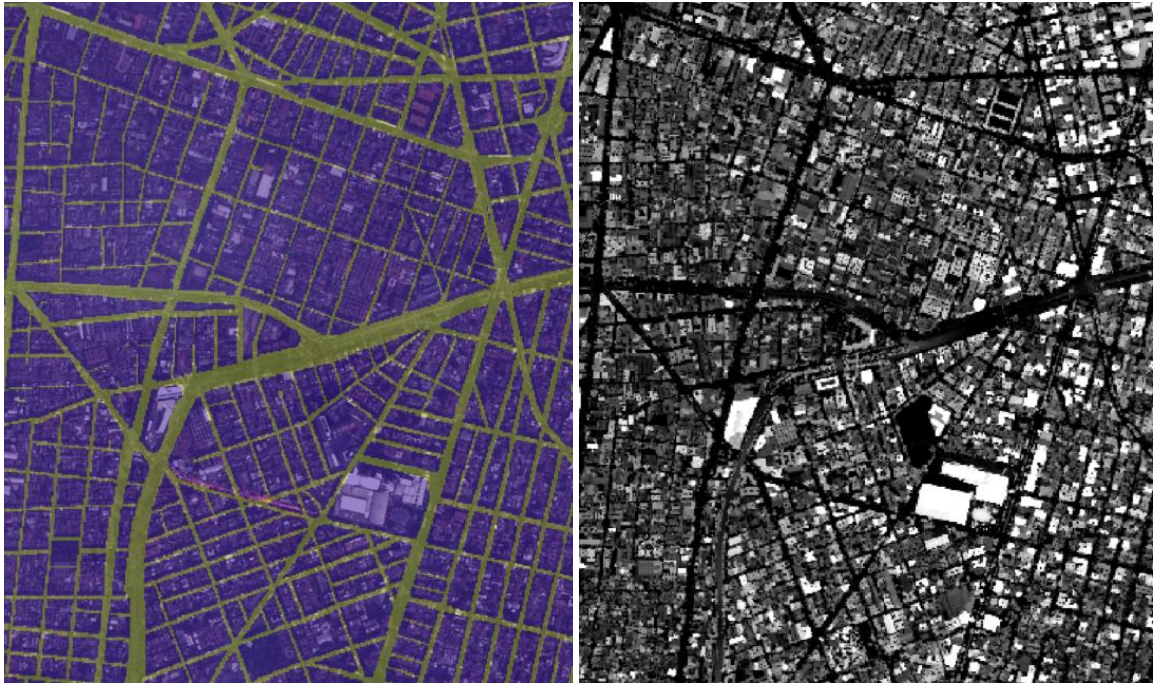


Fig. 2.8 Capa de manzanas y vialidades pavimentadas (izquierda) y altura de la vegetación y la parte urbana (derecha).
(Elaboración propia)

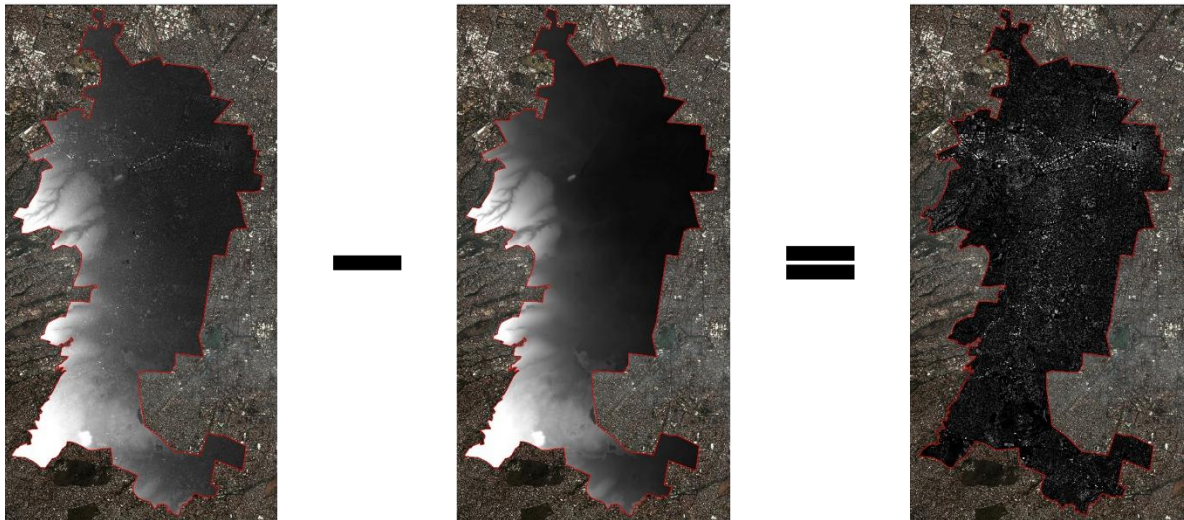


Fig. 2.9 Resta de los rasters del Modelo Digital de Superficie menos el Modelo Digital del Terreno para obtener la altura de edificios y vegetación dentro de la RAVUCP. (Elaboración propia)

Con la combinación de las capas se realizó la clasificación de 6 categorías: pastos y vegetación de menos de 1 m, arbustos y vegetación de 1 a 2 m, árboles mayores a 2 m, edificios, pavimento y cuerpos de agua, los polígonos de agua de la CDMX se tomaron directamente del inventario de INEGI.

Tabla 2.2 Tabla de las categorías utilizados para clasificar la cobertura de suelo de la RAVUCP y los parámetros utilizados.
(Elaboración propia)

Clasificación	Elementos para determinarlo
Construcción	Categorizado a partir del índice NDVI como urbano, con una altura mayor a 1 m.
Pavimento	Categorizado a partir del índice NDVI como urbano con una altura menor a 1 m posteriormente cruzado con la red de vialidades de la Ciudad de México
Pasto	Categorizado a partir del índice NDVI como no urbano, altura menor a 1 m
Arbusto	Categorizado a partir del índice NDVI como no urbano, altura de 1 m a 2 m
Árboles	Categorizado a partir del índice NDVI como no urbano, alturas mayores a 2 m
Cuerpos de agua	Polígonos tomados directamente de la base de datos del INEGI

Fue necesario multiplicar el NDVI por 100 para de esta manera poder conservar los valores decimales a partir de los cuales se determinó el límite inferior a partir del cual identificar la vegetación 0.23 -> 23. Con la combinación de las capas se utilizó un código para poder realizar la clasificación directamente en la capa para después reclasificarlas con los valores específicos para cada categoría.

- NDVI100: NDVI multiplicado por 100
- CON_MSMT_CL1: altura producto de la resta del MDS – MDT (en metros)
- MANPAV: Capa para determinar si corresponde a manzana (Valor 2) o a calles pavimentadas (Valor 1)

```
If [NDVI100] >= 23 and [CON_MSMT_CL1] <= 2 and [CON_MSMT_CL1] >=1 Then
tipo = "Arbusto"

elseif [NDVI100] >= 23 and [CON_MSMT_CL1] < 1 Then
tipo = "Pasto"

elseif [NDVI100] >= 23 and [CON_MSMT_CL1] >2 Then
tipo = "Arbol"

elseif [NDVI100] < 23 and [MANPAV] =2 and [CON_MSMT_CL1] >= 1 Then
tipo = "Construccion"

else
tipo = "Pavimento"
end if
```

*Fig. 2.10 Código utilizado para realizar la clasificación en la capa producto de la combinación de las tres capas (2016).
(Elaboración propia)*





Fig. 2.11 Comparativa de una imagen satelital (arriba) con la clasificación obtenida (abajo). (Elaboración propia)

Con la clasificación realizada se aplicó un filtro mayoritario para eliminar el ruido o el llamado efecto sal pimienta de la capa, dado que estos pixeles se pueden considerar como un error en la clasificación, el filtro mayoritario reemplaza las celdas según el valor más común entre sus vecinos contiguos ya sean 4 u 8.



Fig. 2.12 Ráster de entrada y de salida después de utilizar el filtro mayoritario para reducir el ruido de la imagen (ESRI, 2016).

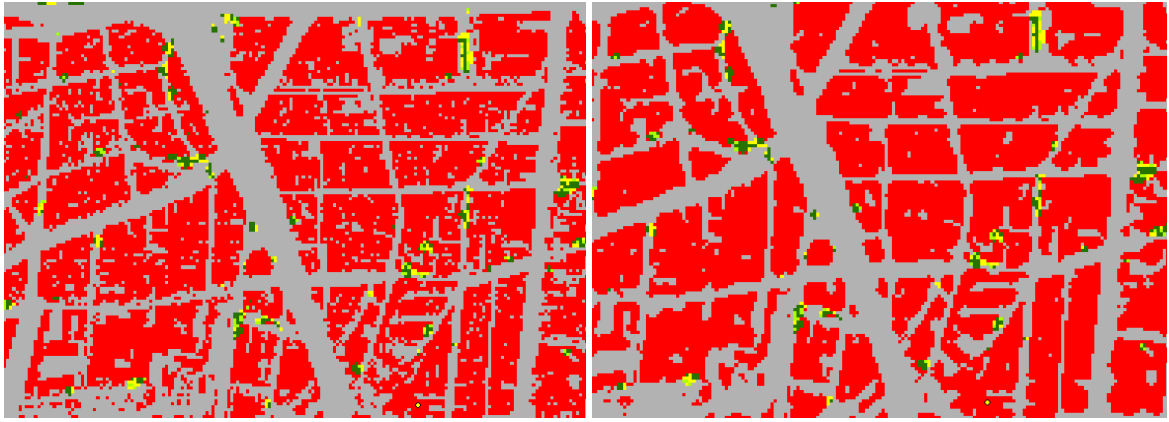


Fig. 2.13 Antes y después de usar el filtro mayoritario para corregir el efecto sal-pimientas de una capa. (Elaboración propia)

Finalmente, el proceso se repitió para los años 2020 y 2024 para obtener la cobertura de la superficie en esas fechas.

Para comprobar la calidad de la clasificación se tomaron 30 puntos de verificación de cada categoría utilizada y así obtener la precisión mediante una matriz de confusión.

A lo largo del trabajo se consideró utilizar otras fuentes de información y de datos para la obtención de la mejor clasificación, sin embargo, la obtenida a través de esta metodología proporciona la mejor resolución para el área de estudio.

Estimación de islas de calor urbano

Dado que la temperatura puede ser medida en la superficie del planeta o en la capa de aire justo por encima de la superficie se pueden utilizar distintas metodologías para analizar esta información. Es importante tomar en cuenta que las islas de calor se encuentran sobre la superficie por lo cual no son lo mismo que la temperatura superficial.

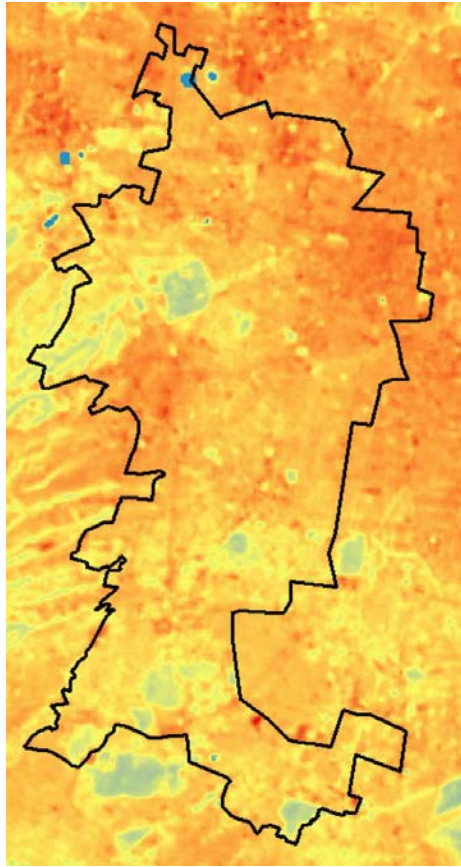


Fig. 2.14 La temperatura superficial para mayo del año 2020 y la RAVUCP. (Elaboración propia)

También es posible encontrar información global de las islas de calor la cual se pueden descargar para el día o noche de manera anual o para los meses de verano y de invierno, sin embargo, la resolución de esta información es muy grande por lo cual no es factible utilizarlos en un estudio para un área cómo la de la Ciudad de México.

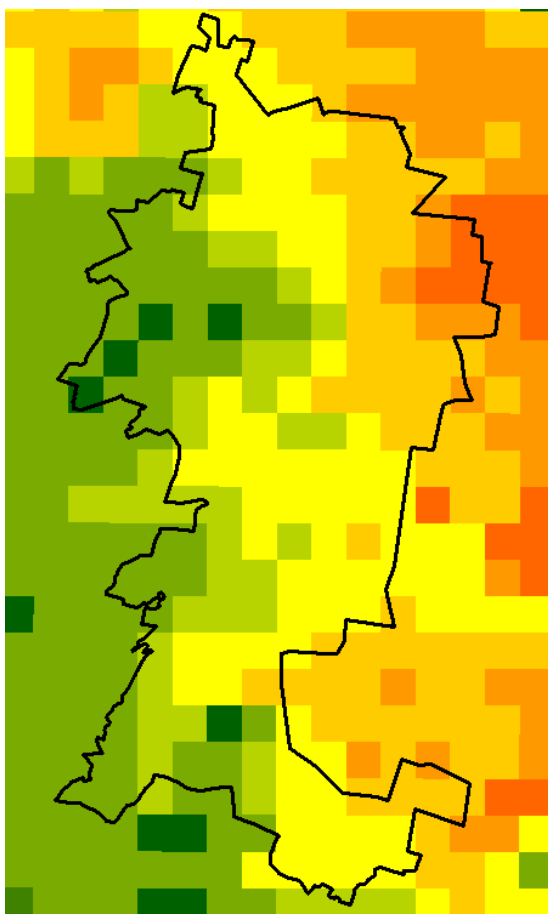


Fig. 2.15 Islas de calor urbano con información del año 2016 para el día durante la época de verano. (Elaboración propia)

Para obtener la temperatura del aire que se encuentra sobre la superficie, específicamente en la capa de las copas urbanas, se utilizan estaciones climáticas superficiales o estaciones meteorológicas las cuales monitorean de manera constante una gran cantidad de variables dentro de las cual se encuentra la temperatura del aire.

Los datos históricos de estaciones climáticas superficiales o estaciones meteorológicas ubicadas en la Ciudad de México, las utilizadas por el sistema CLICOM (CLImate COMputing project) a cargo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) y el Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario (PEMBU) con estaciones ubicadas en las Escuelas Nacionales Preparatorias y los Centros de Ciencias y Humanidades y estaciones de otras instituciones educativas coordinadas por el instituto de ciencias de la atmósfera y cambio climático (ICAYCC) de la UNAM.

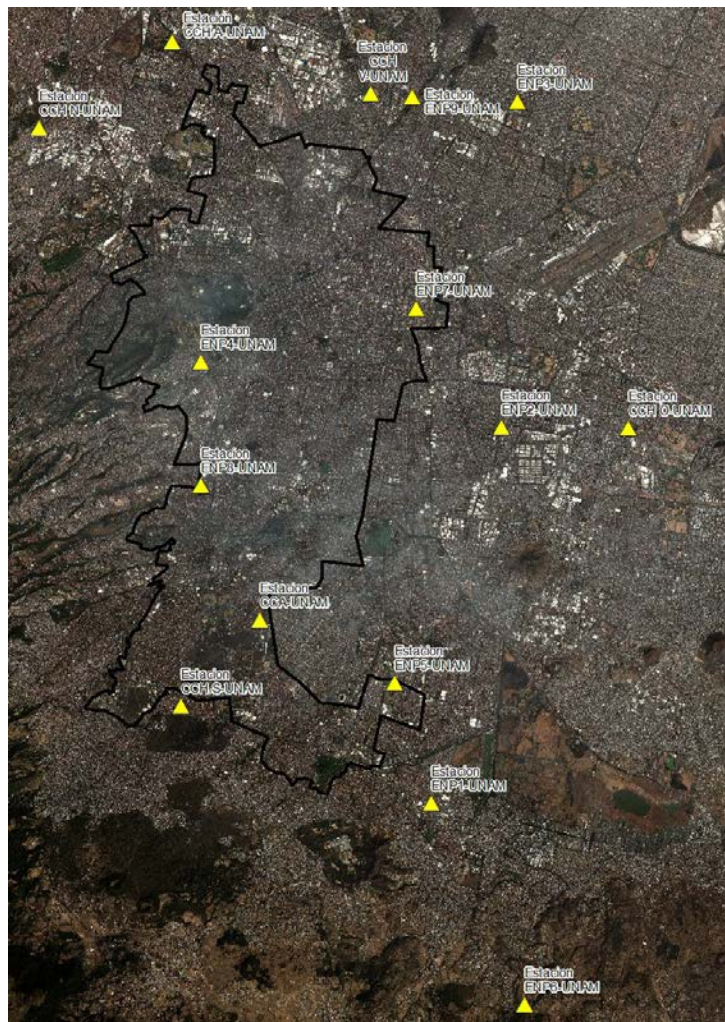


Fig. 2.16 Ubicación de las estaciones del programa de estaciones meteorológicas del bachillerato universitario (PEMBU).
(Elaboración propia)

Para la delimitación de isla de calor se utilizaron los datos de temperatura de las estaciones meteorológicas de los bachilleratos de la UNAM dados que estos se encuentran distribuidos a lo largo del área de interés (fig. 2.16), son un registro de las temperaturas diarias y en ocasiones por horas del día, por lo cual se elegirá un día de los meses más calurosos de la Ciudad de México, abril y mayo y una misma hora (la de mayores temperaturas) para tratar de homogenizar los datos. La información se descargó en formato Excel tomando como base el día 15 de mayo ya que se trata de uno de los meses dónde se presenta una mayor temperatura en la ciudad.

Sin embargo, el uso de información de estaciones meteorológicas para la delimitación de islas de calor presenta dos problemas importantes, el primero es la disponibilidad de información, ya sea por falta de acceso a ella o por qué algunos registros no se encuentran completos esto se puede deber a fallos en el equipo o la falta de actualización en las bases de datos. Las 15 estaciones meteorológicas del programa de estaciones meteorológicas del bachillerato universitario se encuentran en funcionamiento y la información está disponible.

Las estaciones ENP5-UNAM, CCH V-UNAM y ENP1-UNAM no tienen información para el 15 de mayo del 2024 por lo cual se tomó la temperatura del 16 de mayo, 23 de mayo y 30 de abril respectivamente y para el 15 de mayo del 2020 la estación CCA-UNAM no tenía medición de temperatura y se tomó la del 13 de mayo de 2020, así mismo se tomó la información del 16 de mayo de 2019 para las estaciones ENP2-UNAM, ENP4-UNAM, ENP6-UNAM, ENP8-UNAM y ENP9-UNAM en lugar de la información del 15 de mayo del 2020 ya que esas estación no tienen información para el año 2020.

Tabla 2.3 Datos puntuales de las estaciones meteorológicas de la UNAM para el 15 de mayo del 2016

Punto	Lat.	Lon.	Temp. (c°)
Estación CCA-UNAM	2136919.74	481501.875	21.3
Estación CCH A-UNAM	2156132.39	478583.398	22.7
Estación CCH O-UNAM	2143296.04	493731.127	22.8
Estación CCH S-UNAM	2134078.85	478872.484	21.5
Estación CCH V-UNAM	2154421.69	485171.732	24.1
Estación CCH N-UNAM	2153272.22	474172.132	22.6
Estación ENP1-UNAM	2130851.14	487180.459	22
Estación ENP2-UNAM	2143320.12	489509.88	23.1
Estación ENP3-UNAM	2154141.69	490061.869	22.7
Estación ENP4-UNAM	2145508.5	479536.74	21.9
Estación ENP5-UNAM	2134835.48	485985.629	22.9
Estación ENP6-UNAM	2124143.79	490287.213	23.8
Estación ENP7-UNAM	2147261.22	486688.113	22.4
Estación ENP8-UNAM	2141392.22	479532.093	21.4
Estación ENP9-UNAM	2154309.95	486556.882	23.1

Tabla 2.4 Datos puntuales de las estaciones meteorológicas de la UNAM para el 15 de mayo del 2020.

Punto	Lat.	Lon.	Temp. (c°)
Estación CCA-UNAM	2136919.743	481501.875	26.2*
Estación CCH A-UNAM	2156132.39	478583.398	27.6
Estación CCH O-UNAM	2143296.044	493731.127	27.1
Estación CCH S-UNAM	2134078.845	478872.484	25.9
Estación CCH V-UNAM	2154421.688	485171.732	28.7
Estación CCH N-UNAM	2153272.219	474172.132	27.3
Estación ENP1-UNAM	2130851.144	487180.459	25.3
Estación ENP2-UNAM	2143320.12	489509.88	26.9*
Estación ENP3-UNAM	2154141.694	490061.869	27.6
Estación ENP4-UNAM	2145508.5	479536.74	26.3*
Estación ENP5-UNAM	2134835.479	485985.629	29.6
Estación ENP6-UNAM	2124143.785	490287.213	26.9*
Estación ENP7-UNAM	2147261.222	486688.113	27.1
Estación ENP8-UNAM	2141392.219	479532.093	25*
Estación ENP9-UNAM	2154309.948	486556.882	26.8*

Tabla 2.5 Datos puntuales de las estaciones meteorológicas de la UNAM para el 15 de mayo del 2024.

Punto	Lat.	Lon.	Temp. (c°)
Estación CCA-UNAM	2136919.743	481501.875	29.6
Estación CCH A-UNAM	2156132.39	478583.398	30.6
Estación CCH O-UNAM	2143296.044	493731.127	30.3
Estación CCH S-UNAM	2134078.845	478872.484	29.7
Estación CCH V-UNAM	2154421.688	485171.732	33.1*
Estación CCH N-UNAM	2153272.219	474172.132	31.2
Estación ENP1-UNAM	2130851.144	487180.459	29.5*
Estación ENP2-UNAM	2143320.12	489509.88	30.1
Estación ENP3-UNAM	2154141.694	490061.869	30.8
Estación ENP4-UNAM	2145508.5	479536.74	30.4
Estación ENP5-UNAM	2134835.479	485985.629	31.4*
Estación ENP6-UNAM	2124143.785	490287.213	30.9
Estación ENP7-UNAM	2147261.222	486688.113	31.2
Estación ENP8-UNAM	2141392.219	479532.093	29.1
Estación ENP9-UNAM	2154309.948	486556.882	30.4

La segunda problemática que existe con los datos de las estaciones meteorológicas es que los datos de temperatura no son continuos debido a que son estaciones puntuales con mediciones de la temperatura del aire para ese exacto punto, debido a la distribución de las estaciones específicamente la distancia entre ellas y la cantidad de estas, por lo cual para poder representar de mejor manera en un mapa es necesario realizar una interpolación de los datos sin embargo es necesario rellenar grandes distancias lo cual no permite apreciar el fenómeno de islas de calor urbano de la manera apropiada. El método de interpolación que se utilizó fue el IDW para obtener el promedio de los puntos vecinos con un mayor peso de los puntos más cercanos.

Además de la capacidad de enfriamiento el programa INVEST también proporciona mapas de la temperatura del aire como parte de los productos del procesamiento los cuales también permiten apreciar la existencia de islas de calor.

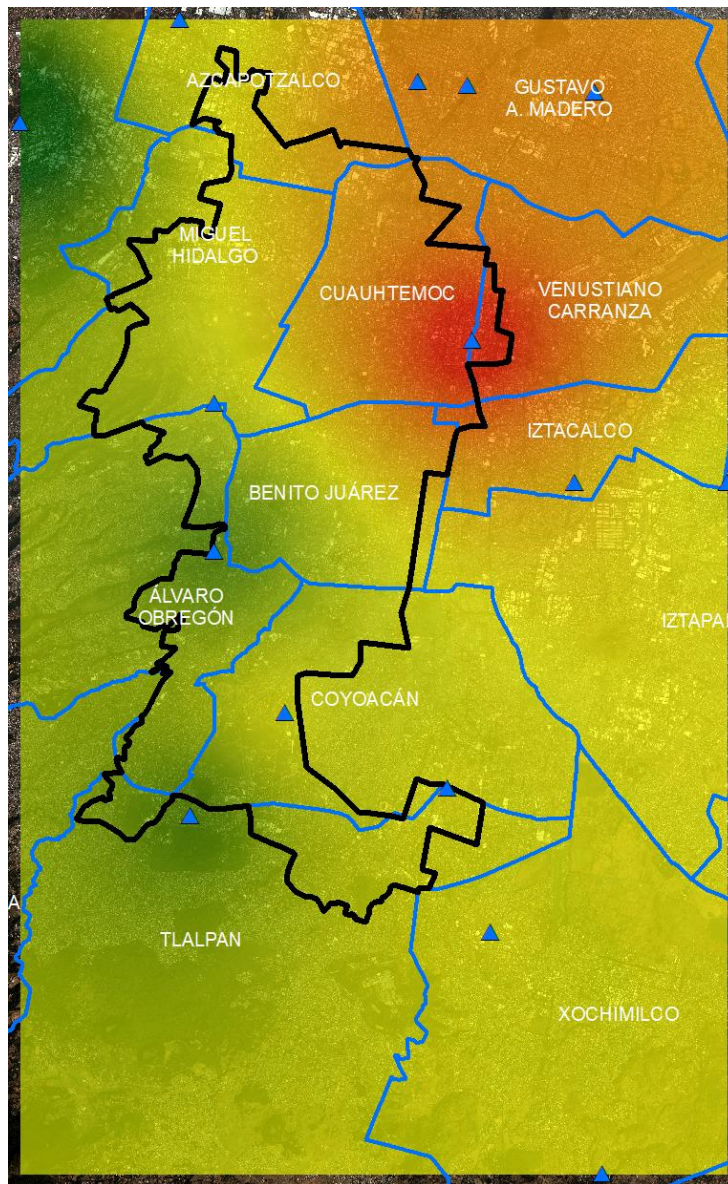


Fig. 2.17 Interpolación de las temperaturas obtenidas de las estaciones meteorológicas de la UNAM en la Ciudad de México para el mes de mayo del 2010 y su ubicación respecto las alcaldías de la CDMX. (Elaboración propia)

Cálculo de la capacidad de enfriamiento urbano 2016, 2020 y 2024

Para la estimación de la capacidad de enfriamiento urbano 2016, 2020 y 2024 se utilizó el modelo Urban Cooling, que forma parte de un conjunto de herramientas para servicios ecosistémicos llamados INVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) desarrollado por Natural Capital Project que es un proyecto que tiene como objetivo mejorar el bienestar de las personas motivando a que exista una mayor inversión en el capital natural para mejorar el desarrollo humano y la conservación del ambiente, proyecto pertenece a la universidad de Stanford (Zawadzka et al., 2021).

El modelo de enfriamiento urbano calcula la capacidad de enfriamiento basado en variables como la sombra, la evapotranspiración de la vegetación, el albedo de la cobertura terrestre, así como

la distancia a la que se encuentran los parques. También calcula el índice de mitigación de calor que es la capacidad de enfriamiento de áreas verde de más de 2 ha (Zawadzka et al., 2021).

Parámetros

Uso del suelo / cobertura del suelo

El uso de suelo o cobertura de suelo describe las propiedades físicas del suelo y/o el uso que le dan las personas. Para correr el modelo es necesario clasificar la cobertura de la superficie. Cada una de las categorías se encuentran en esta capa estarán relacionadas a una tabla con datos biofísicos para cada categoría.

Es importante tener en cuenta que la resolución de la capa de cobertura definirá la resolución cuál de las capas de salida por lo cual esta resolución debe ser lo mejor posible

Tabla biofísica

En esta tabla se encuentran una serie de variables las cuales están asociadas a una categoría específica de la cobertura de suelo, todos los valores del raster deben de estar asociadas a un valor de la tabla. La tabla debe incluir lo siguiente:

- **lucode:** un código que está asociado a cada una de las categorías de cobertura de suelo
- **kc:** el coeficiente de evapotranspiración de los cultivos presentes en la cobertura de suelo, los cuales se puede obtener de diferentes fuentes por ejemplo en manuales de riego y horticultura, el kc para las coberturas de suelo urbanas o sin vegetación se pueden utilizar valores ya establecidos en otras fuentes
- **green_area:** indicar verdadero o falso se trata de un área verde
- **shade:** la proporción de áreas que están cubiertas por copas de árboles de al menos 2 m de altura
- **albedo:** la proporción de radiación solar reflejada esto se puede obtener a partir de valores previamente establecidos

Evapotranspiración

Capa con los valores de evapotranspiración, estos valores se pueden obtener de distintas fuentes, teniendo en cuenta que la resolución sea lo más similar a la de la capa de cobertura de suelo.

Máxima distancia de enfriamiento

Distancia en metros en la cual áreas verdes mayores de 2 hectáreas tienen capacidades de enfriamiento. El valor recomendado es 450 m

Temperatura del aire de referencia

La temperatura del aire en un área rural de referencia donde no existe el efecto de las islas de calor

Efecto de la isla de calor urbana

Diferencia en grados centígrados causados por las islas de calor respecto a la temperatura de referencia rural

Distancia de mezcla de aire

Radio sobre el cual se promediarán las temperaturas de aire tomando en cuenta la mezcla del aire. Los colores recomendados se encuentran entre 500 y 600 m

El elemento más importante para correr los modelos de enfriamiento e InVEST es tener un buen mapa de cobertura de la superficie la cual se encuentra asociada a una tabla con datos biofísicos para cada una de las categorías.

Tabla 2.6 Tabla biofísica de valores asociados a la cobertura de la superficie, basados en los datos utilizados por (Zawadzka et al., 2021) para el mismo modelo con categorías similares.

lucode	Description	Shade	Kc	Albedo	Green_area
1	Pavimento	0	0.001	0.14	0
2	Pasto	0	0.95	0.16	1
3	Construccion	0	0.001	0.25	0
4	Arbol	1	0.95	0.2	1
5	Arbusto	0	0.95	0.18	1
6	Agua	0	0.6525	0.09	1

También fue necesario tener la evapotranspiración, sin embargo, por su resolución fue necesario realizar un down scaling con otros parámetros, cómo la temperatura y el NDVI para tener una resolución apropiada para el trabajo.

Basado en la información encontrada, así como los valores preestablecidos por el programa las variables que se utilizaron fueron:

- Máxima distancia de enfriamiento: 300m
- Temperatura del aire de referencia: 25 °C
- Efecto de la isla de calor urbana: 3 °C
- Distancia de mezcla de aire: 500 m

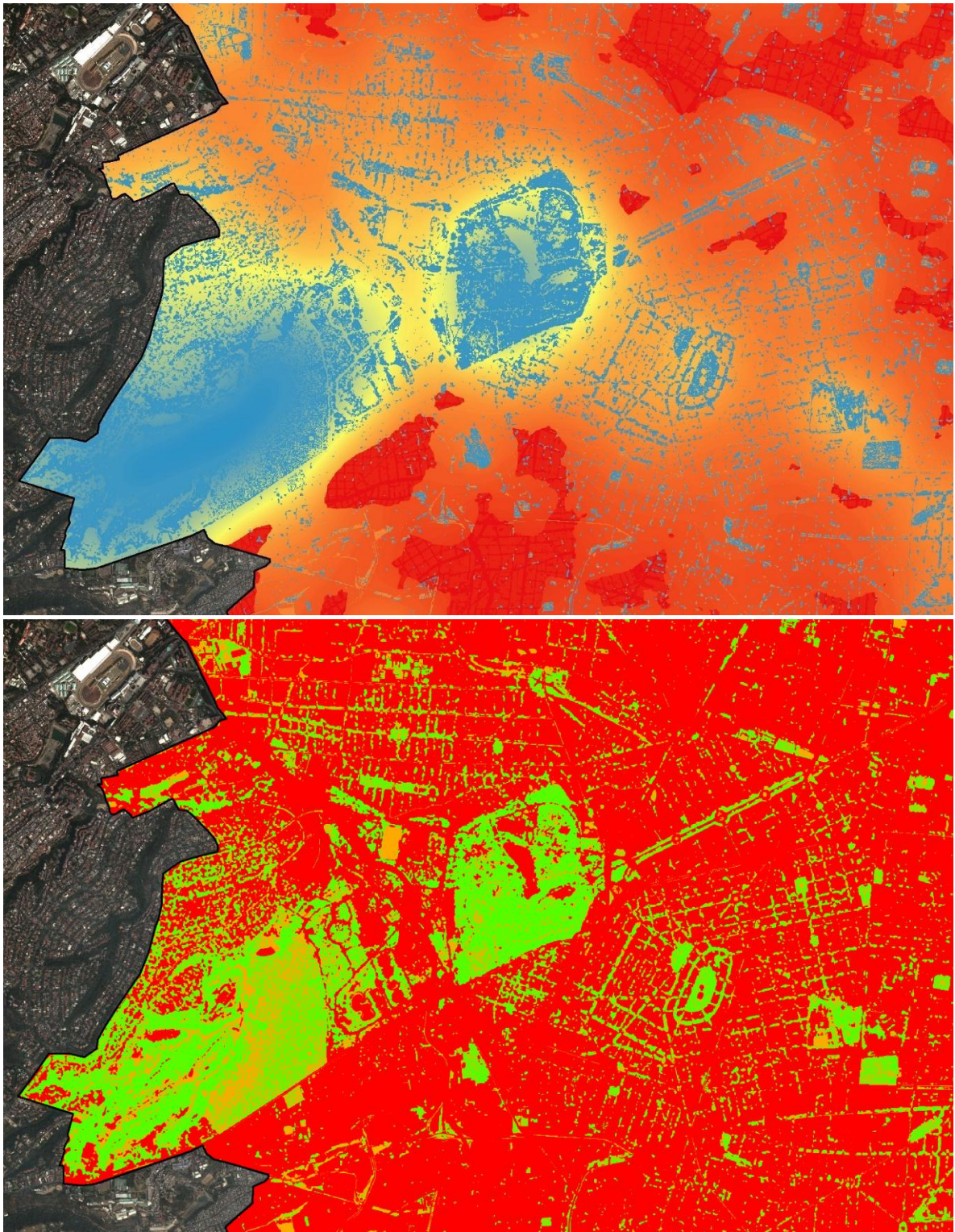


Fig. 2.18 Mapa de índice de mitigación de calor (arriba) y mapa de la capacidad de enfriamiento (abajo). (Elaboración propia)

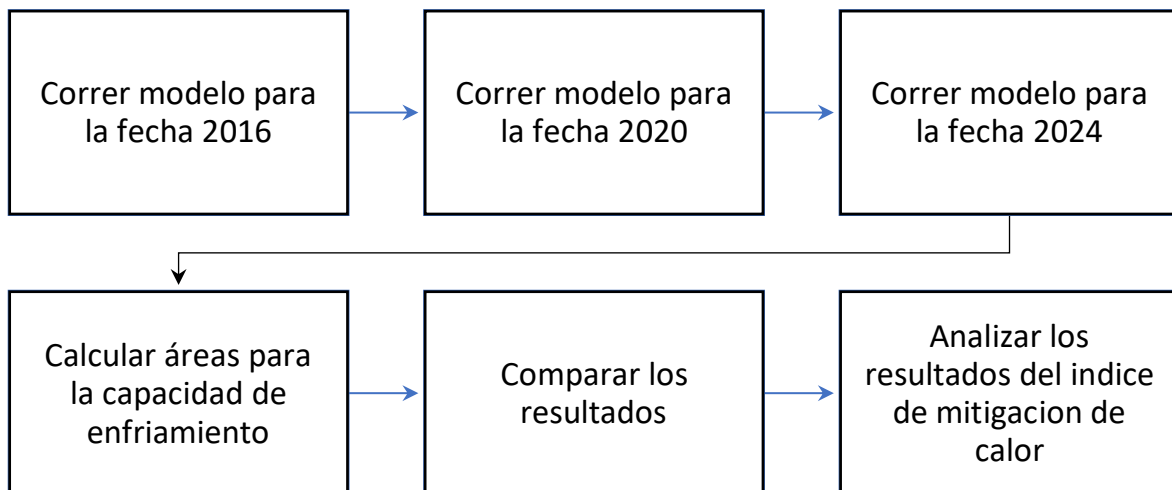


Fig. 2.19 Diagrama de flujo que ilustra el proceso de las simulaciones a realizar en INVEST. (Elaboración propia)

Capítulo 3 Resultados

Estimación de áreas verdes y arbolado urbano 2016, 2020 y 2024

A partir de la combinación de las capas y la clasificación de los valores de dichas capas se obtuvo la cobertura del suelo para las tres distintas fechas, estos mapas serán la base para poder calcular la capacidad de enfriamiento.

Se calculó el área de cada una de las categorías para las distintas fechas en las cuales se aprecia un claro aumento en las áreas de vegetación mientras que la parte urbana de construcción y pavimento tiene una disminución. Este cambio es apreciable en las imágenes principalmente en las calles donde se ve un aumento de la vegetación.

Dado que se utilizó una imagen Spot-6 para el 2016 y dos imágenes Sentinel-2 para los años 2020 y 2024 existe una diferencia en el número total de píxeles lo cual se refleja en un área diferente 15,022.94 ha para la imagen spot y 15,026.135 ha para las imágenes Sentinel, esto se debe al recorte y al diferente acomodo que existe de los píxeles en las orillas del área de interés.

Tabla 3.1 Tablas con las áreas por tipo de superficie y por año. (Elaboración propia)

Clases	2016 (ha)	2020 (ha)	2024 (ha)
Pavimento	4,263.56	3,153.78	2,430.13
Pasto	1,193.43	1,924.99	2,483.35
Construcción	6,626.14	5,594.20	4,620.74
Árbol	2,453.45	3,527.21	4,417.76
Arbusto	469.95	816.58	1,064.12
Agua	16.42	9.37	10.05
Total	15,022.9450	15,026.13	15,026.14

Tabla 3.2 Tablas con las áreas en porcentaje por tipo de superficie y por año. (Elaboración propia)

Clases	2016 (%)	2020 (%)	2024 (%)
Pavimento	28	21	16
Pasto	8	13	17
Construcción	44	37	31
Árbol	16	23	29
Arbusto	3	5	7
Agua	0	0	0
Total	100	100	100

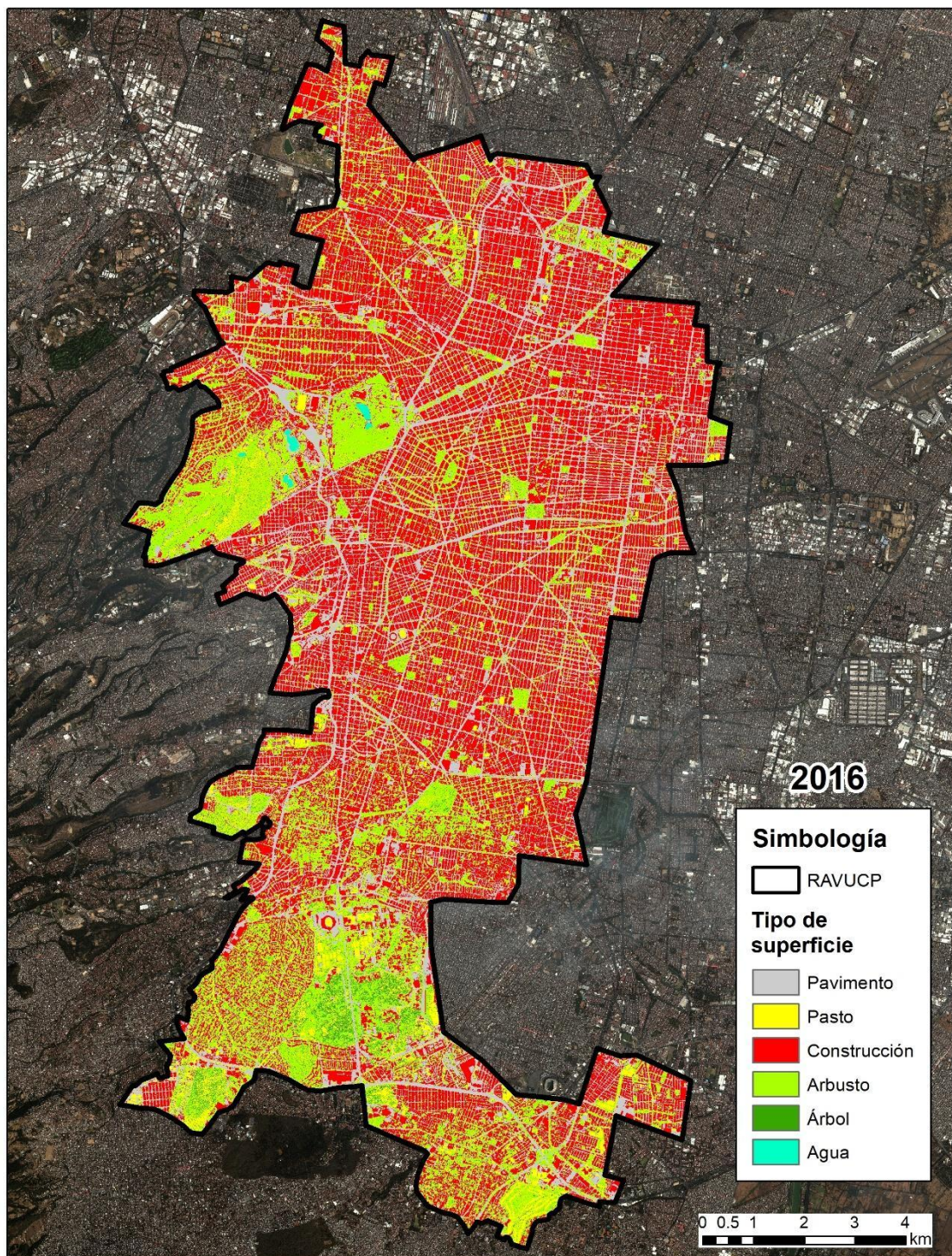


Fig. 3.1 Cobertura de suelo de la RAVUCP para 2016. (Elaboración propia)

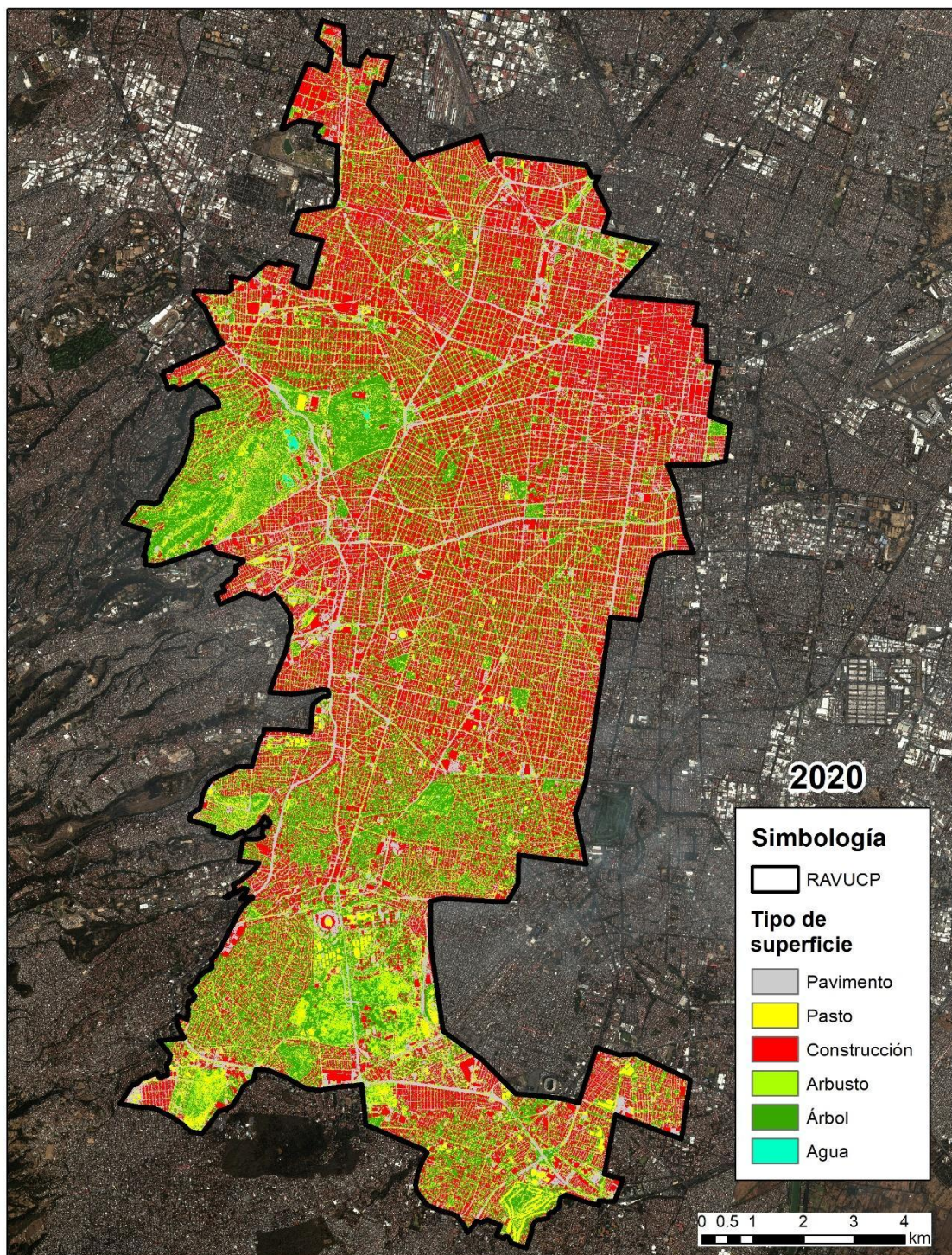


Fig. 3.2 Cobertura de suelo de la RAVUCP para 2020. (Elaboración propia)

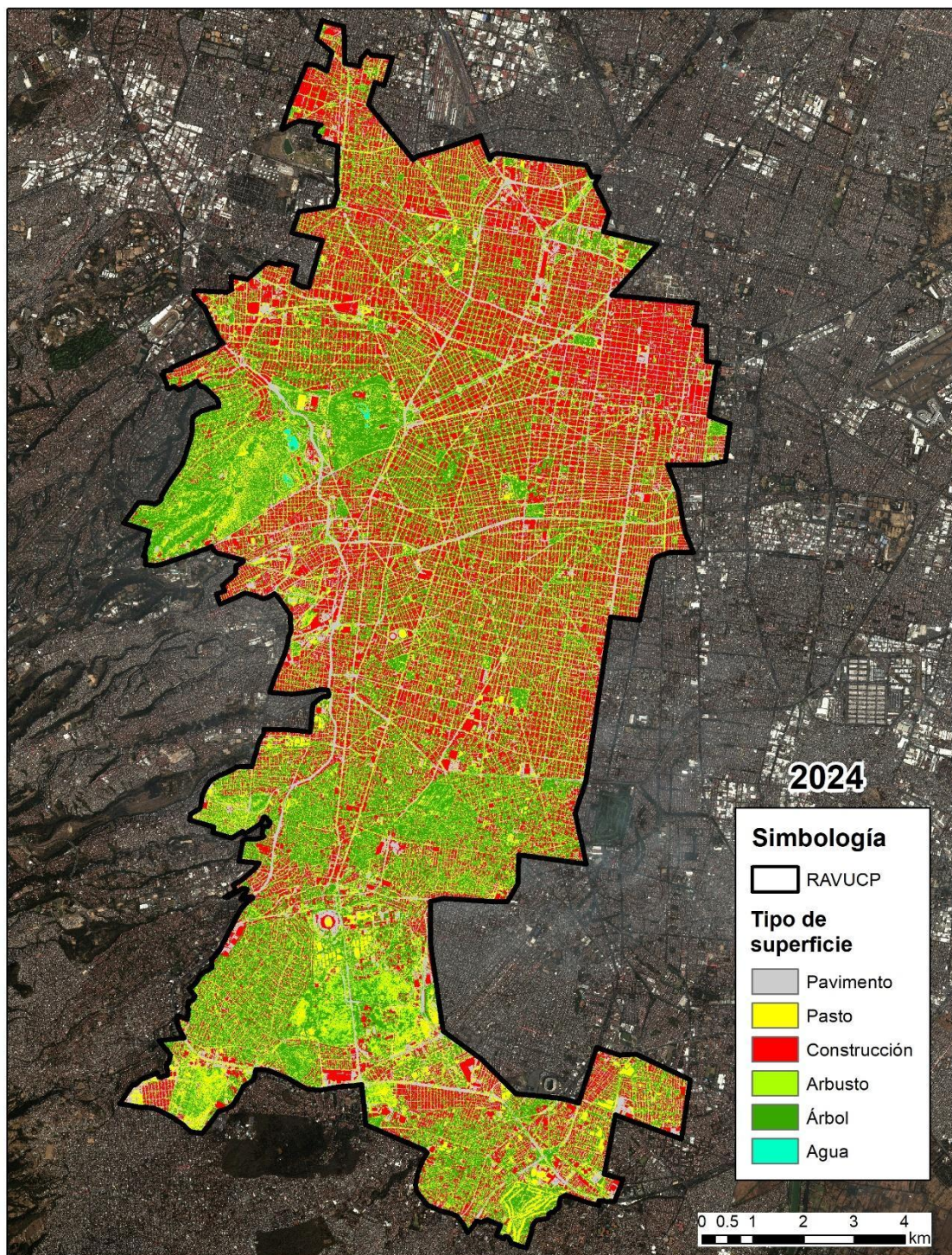


Fig. 3.3 Cobertura de suelo de la RAVUCP para 2024. (Elaboración propia)

A partir de los 30 puntos de verificación y matrices de confusión fue posible obtener la precisión de la clasificación para las tres distintas fechas obteniendo una precisión similar para los años 2022 y 2024.

Tabla 3.3 Matriz de confusión para obtener la precisión 2016. (Elaboración propia)

RasterValu	Pavimento	Pasto	Construcción	Árbol	Arbusto	Total	Precisión
Pavimento	30	1	0	0	0	31	96.77%
Pasto	0	29	0	0	0	29	100%
Construcción	0	0	30	0	3	33	90.91%
Árbol	0	0	0	30	8	38	78.95%
Arbusto	0	0	0	0	19	19	100%
Total	30	30	30	30	30	150	92%

Tabla 3.4 Matriz de confusión para obtener la precisión 2020. (Elaboración propia)

RasterValu	Pavimento	Pasto	Construcción	Árbol	Arbusto	Total	Precisión
Pavimento	29	1	1	0	0	31	93.55%
Pasto	1	29	0	1	0	31	93.55%
Construcción	0	0	29	0	0	29	100%
Árbol	0	0	0	28	0	28	100%
Arbusto	0	0	0	1	30	31	96.77%
Total	30	30	30	30	30	150	96.67%

Tabla 3.5 Matriz de confusión para obtener la precisión 2024. (Elaboración propia)

RasterValu	Pavimento	Pasto	Construcción	Árbol	Arbusto	Total	Precisión
Pavimento	28	1	1	0	0	30	93.33%
Pasto	2	29	0	1	0	32	90.63%
Construcción	0	0	29	0	0	29	100%
Árbol	0	0	0	28	0	28	100%
Arbusto	0	0	0	1	30	31	96.77%
Total	30	30	30	30	30	150	96%

Estimación de islas de calor urbano

Los resultados obtenidos a partir de la interpolación de las temperaturas a partir de datos de las estaciones meteorológicas permitieron identificar zonas donde la temperatura de la ciudad es mayor, aunque la resolución de la interpolación a causa de las distancias de las estaciones no

permite definir los límites de la isla de calor presente en la ciudad con una buena precisión y las islas de calor urbano dentro de la región.

Sin embargo, se aprecia dos áreas que, si presentan una mayor temperatura en la parte suroriente y nororiente de la RAVUCP para los tres años, así como una en el 2016 en la parte central del oriente del área, lo cual se asocia a una menor cantidad de vegetación urbana en el oriente de la ciudad o a que son áreas más centrales de la ciudad de México por lo cual son áreas que se encuentran más alejadas de los bosques y vegetación rural hacia la periferia de la ciudad.

También es importante mencionar que existe un cambio en la temperatura general de la ciudad del 2016 al 2024 de alrededor de 8°- 9°, también el hecho de que la temperatura mínima de 2020 corresponde a la temperatura máxima de 2016 así como la mínima del 2024 que corresponde con la máxima del 2020. En ambos fenómenos no es posible asegurar que esto se deba a un cambio en la cobertura de suelo o a el efecto del calentamiento global o incluso a variaciones de los días selecciones que pudiesen corresponder a un día con una mayor nubosidad con una menor temperatura respecto a otros días.

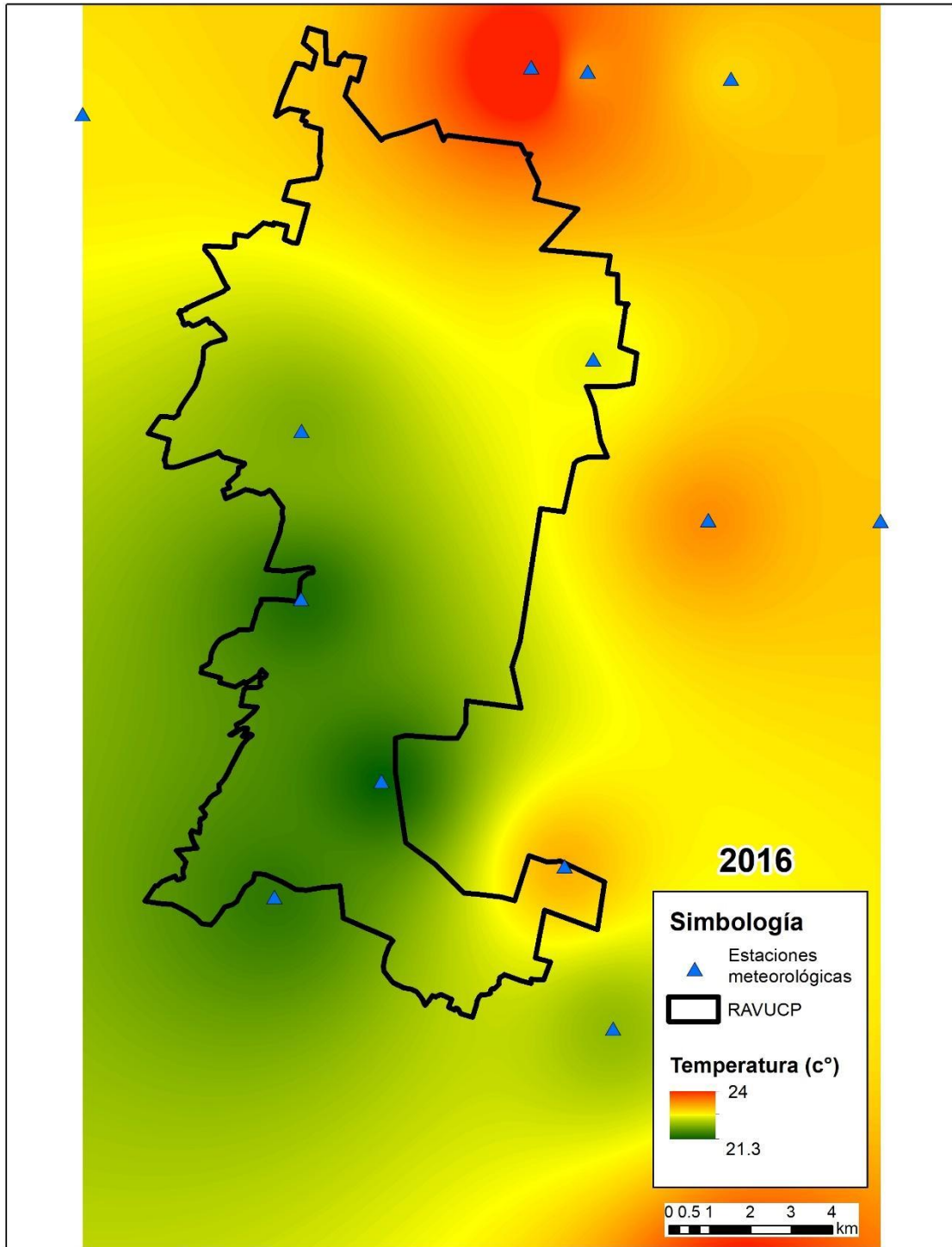


Fig. 3.4 Interpolación de las temperaturas a partir de los datos de las estaciones meteorológicas 2016. (Elaboración propia)

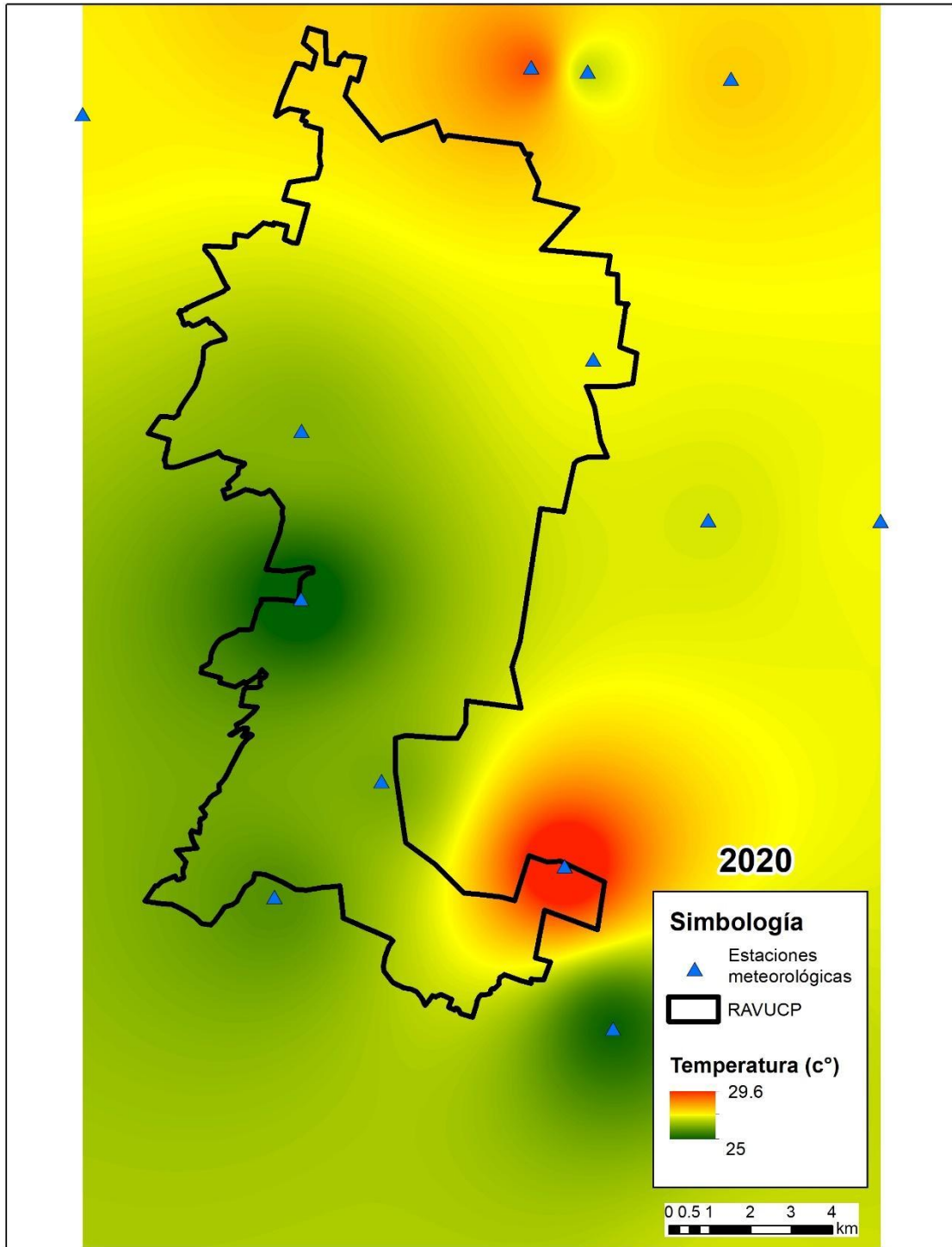


Fig. 3.5 Interpolación de las temperaturas a partir de los datos de las estaciones meteorológicas 2020. (Elaboración propia)

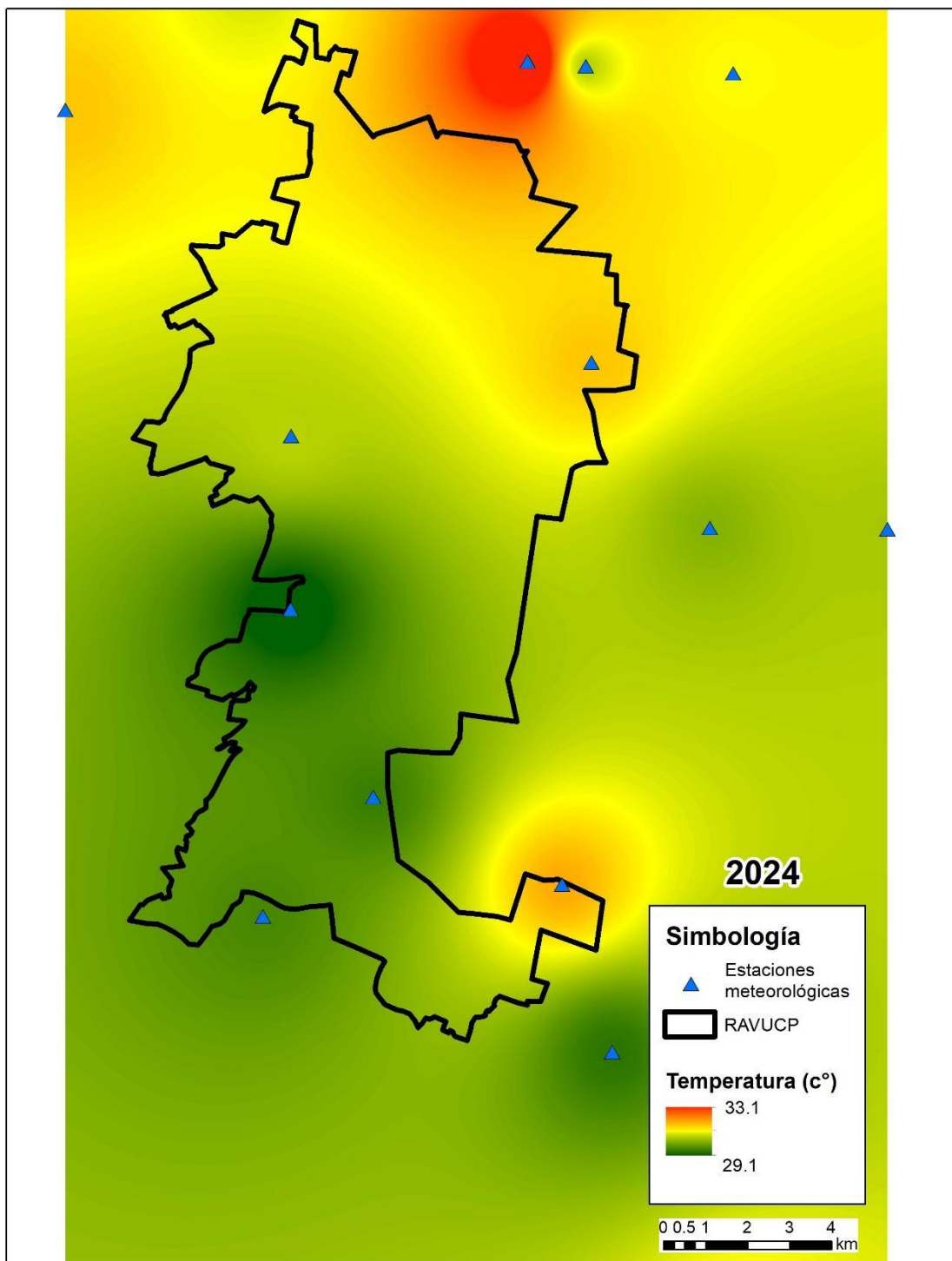


Fig. 3.6 Interpolación de las temperaturas a partir de los datos de las estaciones meteorológicas 2024. (Elaboración propia)

Los mapas de temperatura del aire generados por INVEST también presentan una mayor temperatura en la parte oriente del mapa (aunque la diferencia es de solo 2 grados), sin embargo,

es más difícil poder identificar islas de calor urbano, pero se aprecia claramente el impacto de las áreas verdes de la región en la temperatura del aire (Chapultepec al poniente y Ciudad Universitaria hacia el sur).

Se aprecia un cambio claro en la distribución del calor a lo largo de los años analizados el área de máxima temperatura en el 2016 es mucho mayor en comparación con la del 2020 y la del 2024.

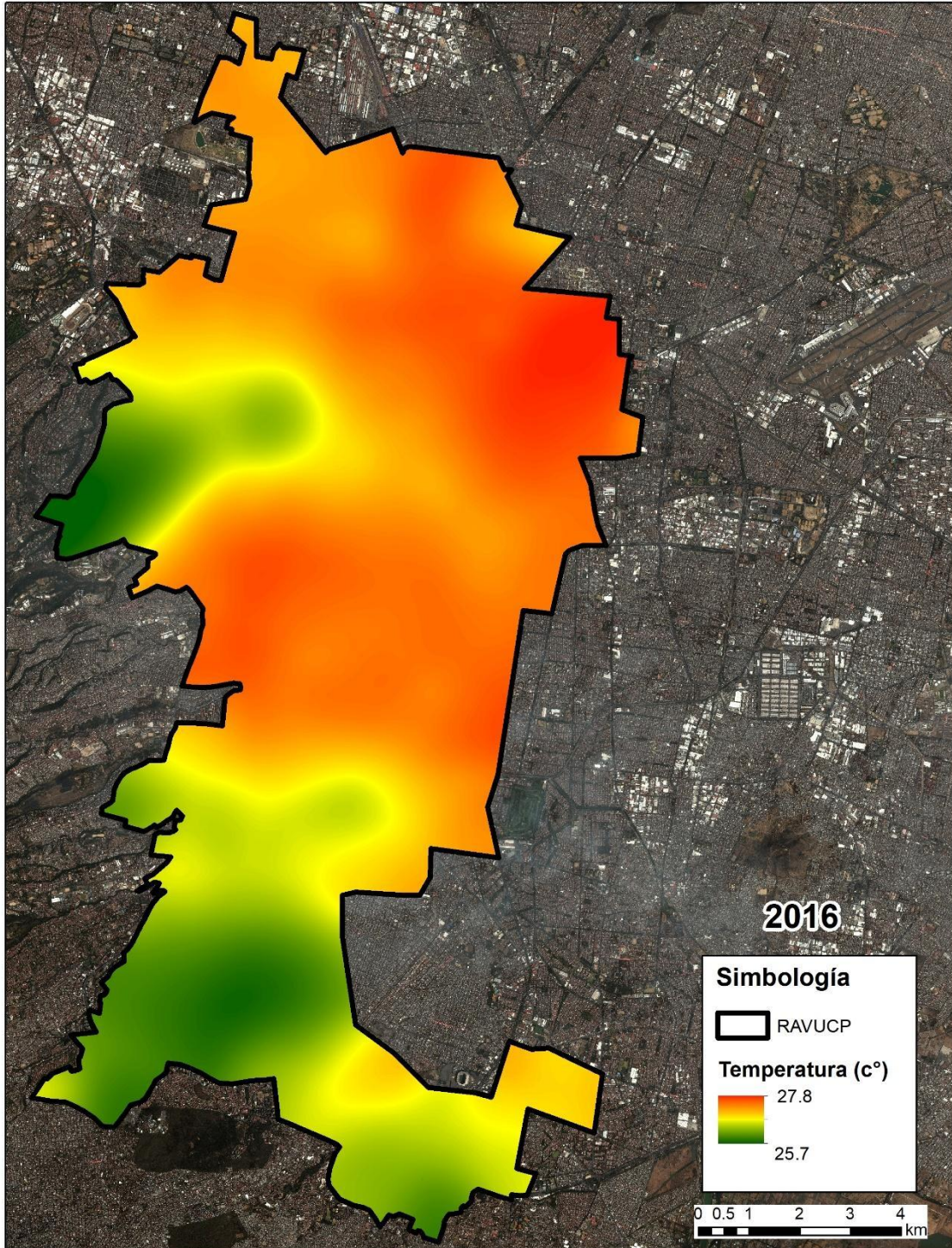


Fig. 3.7 Temperatura del aire generada por el procesamiento de INVEST 2016. (Elaboración propia)

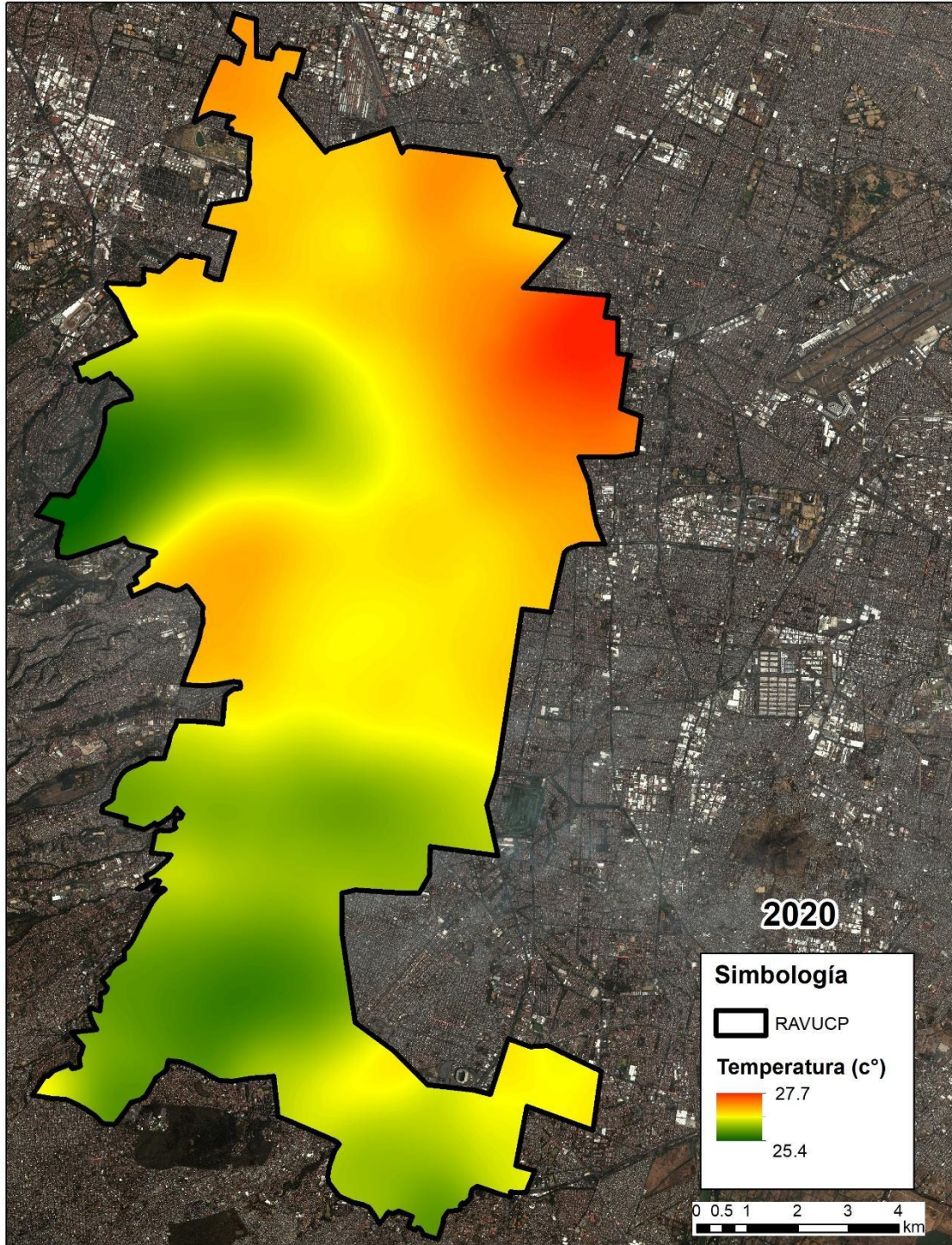


Fig. 3.8 Temperatura del aire generada por el procesamiento de INVEST 2020. (Elaboración propia)

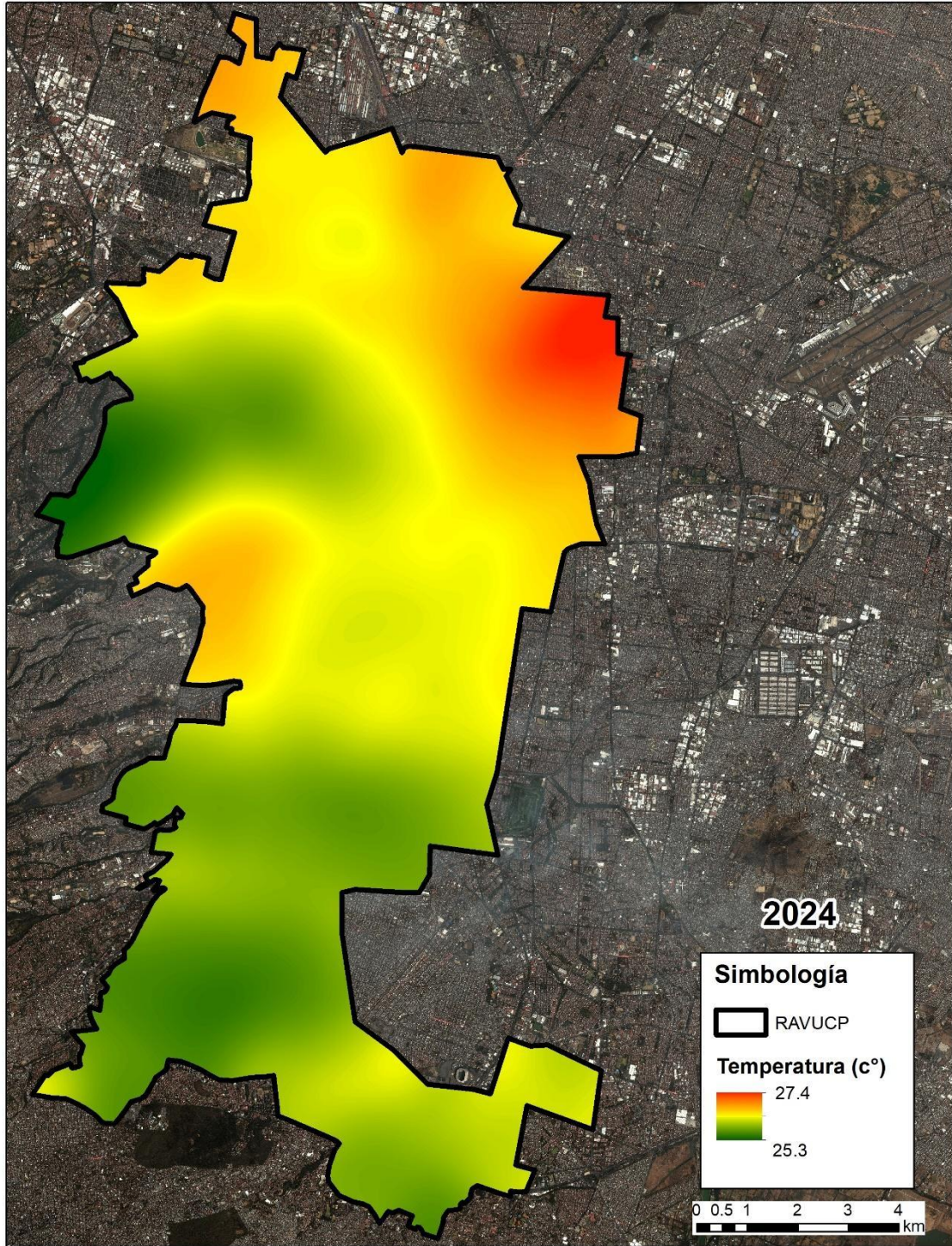


Fig. 3.9 Temperatura del aire generada por el procesamiento de INVEST 2024. (Elaboración propia)

Capacidad de enfriamiento urbano 2016, 2020 y 2024

Como resultado del procesamiento de INVEST se obtienen los mapas con la capacidad de enfriamiento para los tres años analizados, se aprecian resultados similares a los vistos durante la clasificación de cobertura de áreas verdes, un aumento de la vegetación a lo largo de los años que se ve reflejado como una mayor capacidad de enfriamiento, para el 2016 se aprecia una menor capacidad de enfriamiento principalmente en las partes urbanas del pavimento entre manzanas, con lo cual podemos inferir que la vegetación en las calles aumenta para los años 2020 y 2024.

Los valores para la capacidad de enfriamiento para los tres años van de 0.028 (menos capacidad de enfriamiento) a 0.83 (mayor capacidad de enfriamiento) lo cual se puede clasificar en cinco categorías desde muy baja hasta muy alta, los valores obtenidos se encuentran principalmente en las categorías muy bajas y bajas o muy altas, no hay datos en ninguno de los años para las categorías media y alta dado que no se dan las condiciones necesarias, en los distintos años analizados se aprecia un aumento en las capacidades de enfriamiento bajas y muy altas con una pérdida en el área con la capacidad muy baja

Tabla 3.6 Tabla con las áreas de la capacidad de enfriamiento por categoría. (Elaboración propia)

Categorías	2016 (ha)	2020 (ha)	2024 (ha)
Muy baja	10905.99	8745.86	7060.87
Baja	1663.36	2738.00	3547.44
Media	0	0	0
Alta	0	0	0
Muy alta	2453.44	3521.88	4417.75

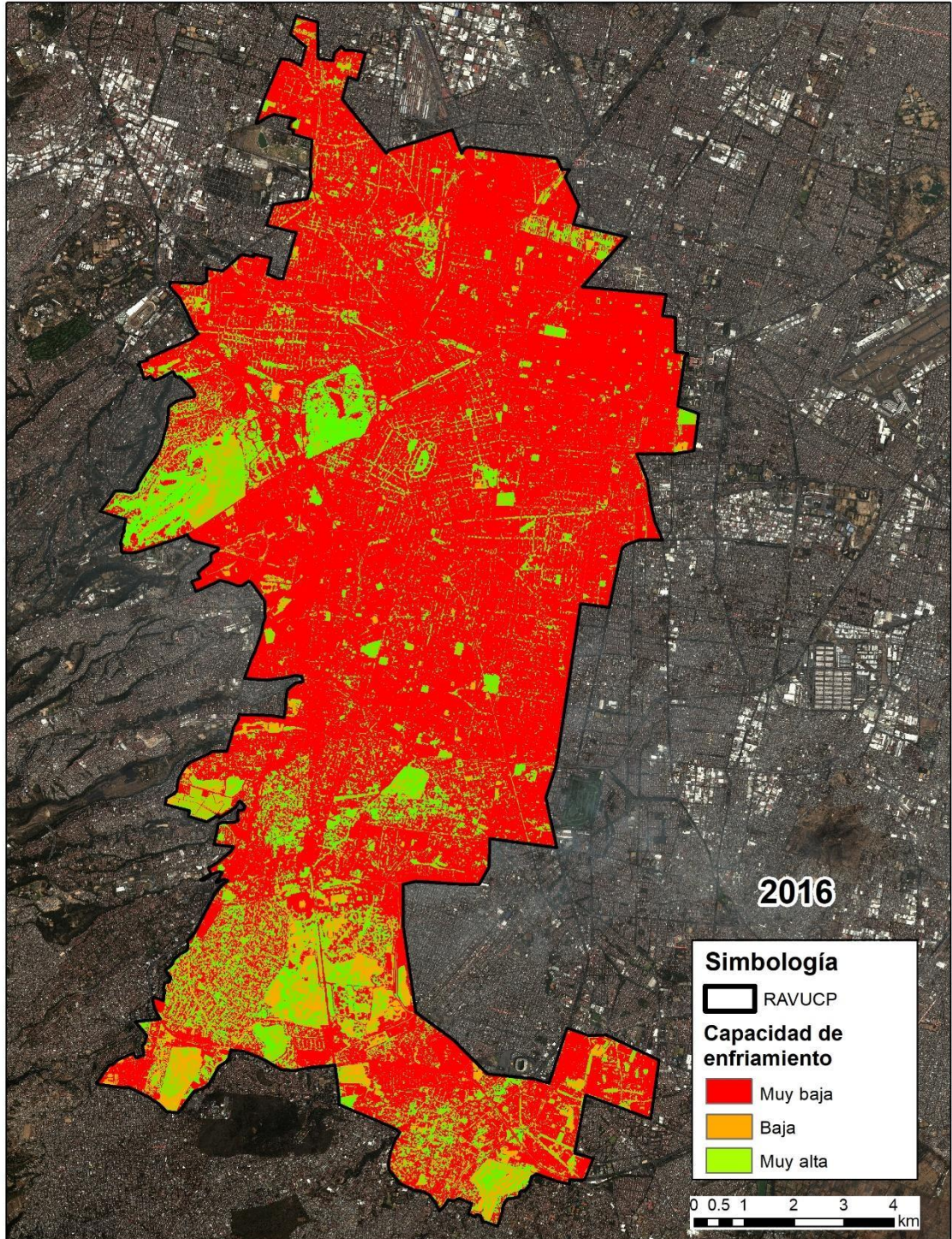


Fig. 3.10 Capacidad de enfriamiento de INVEST 2016. (Elaboración propia)

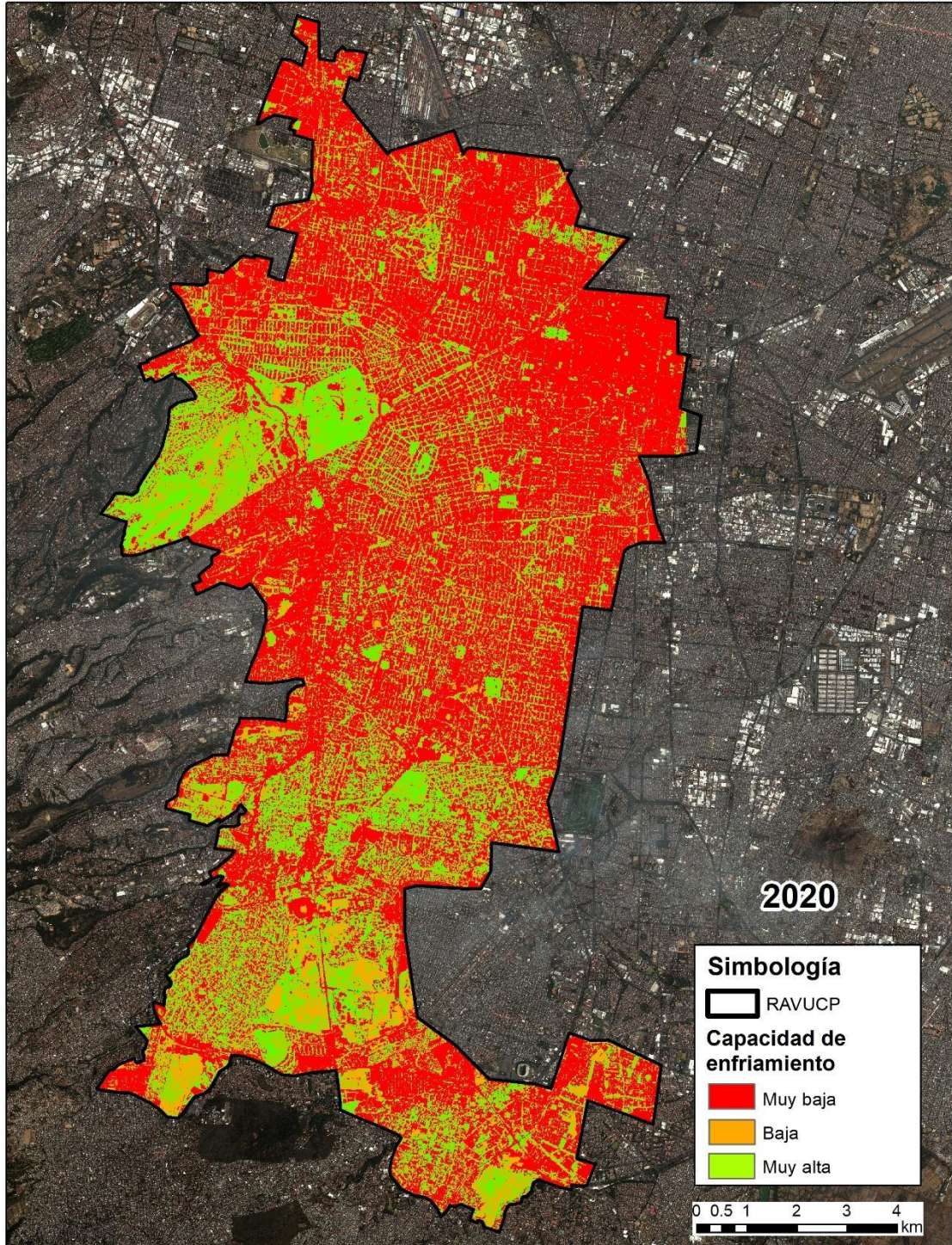


Fig. 3.11 Capacidad de enfriamiento de INVEST 2020. (Elaboración propia)

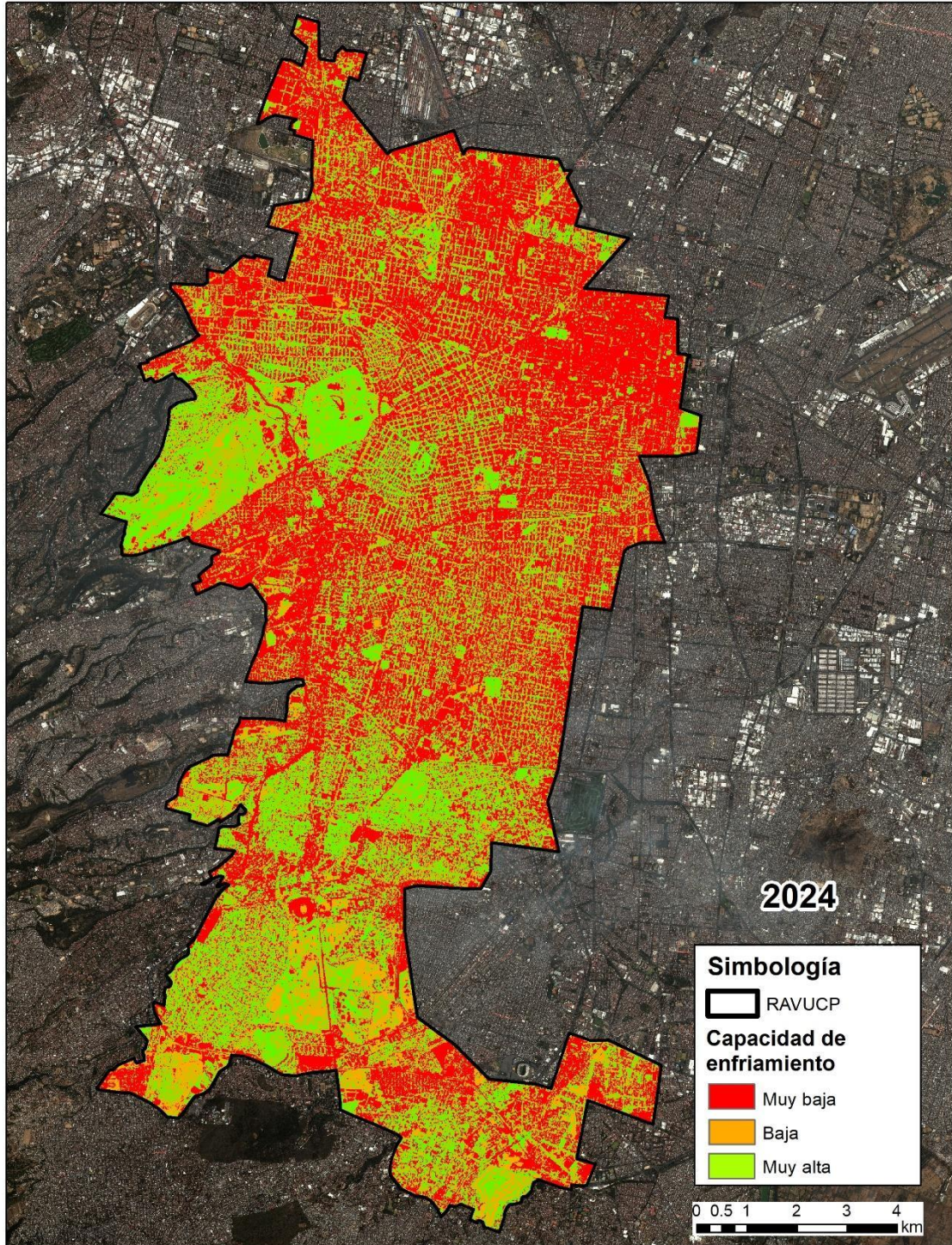


Fig. 3.12 Capacidad de enfriamiento de INVEST 2024. (Elaboración propia)

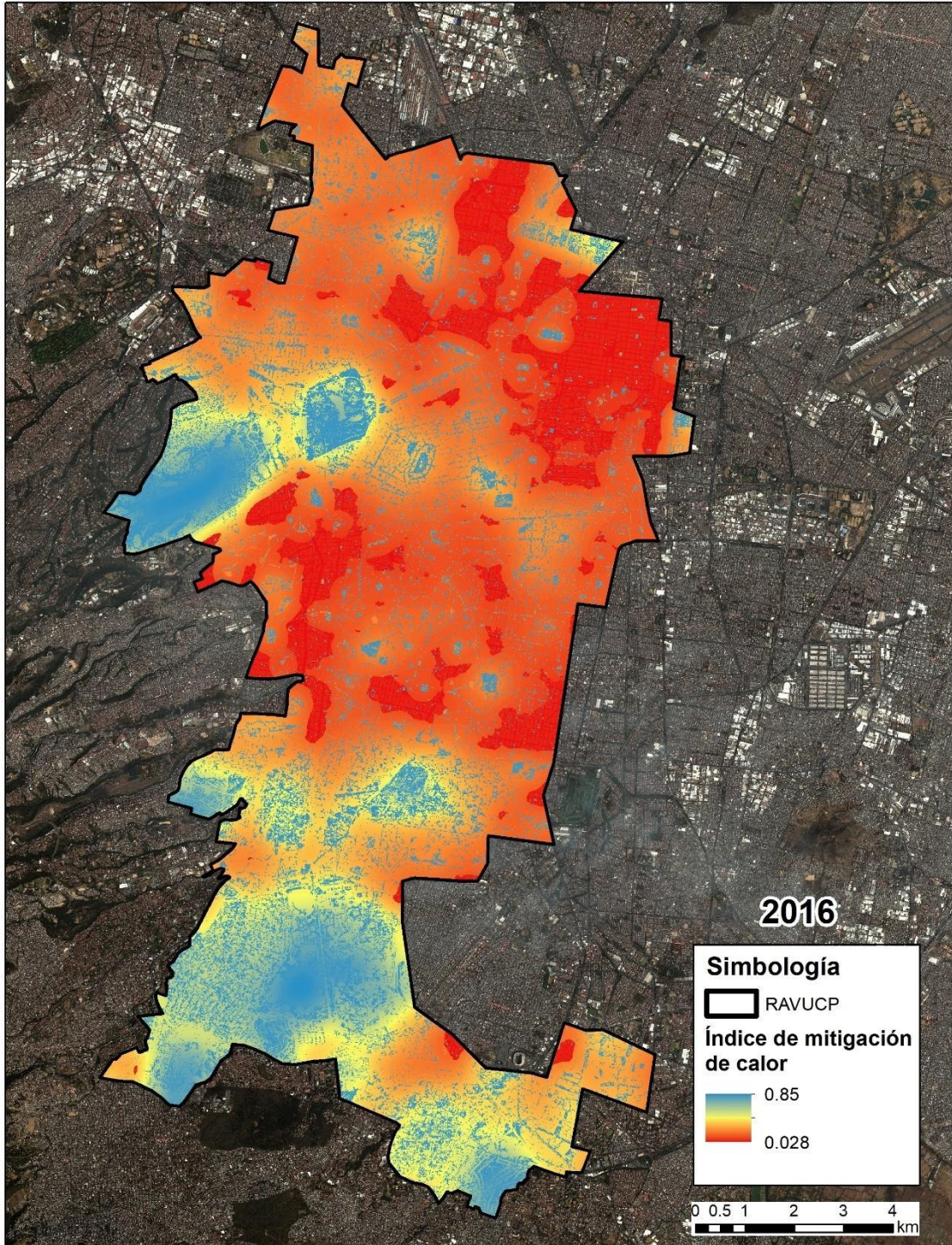


Fig. 3.13 Índice de mitigación de calor de INVEST 2016. (Elaboración propia)

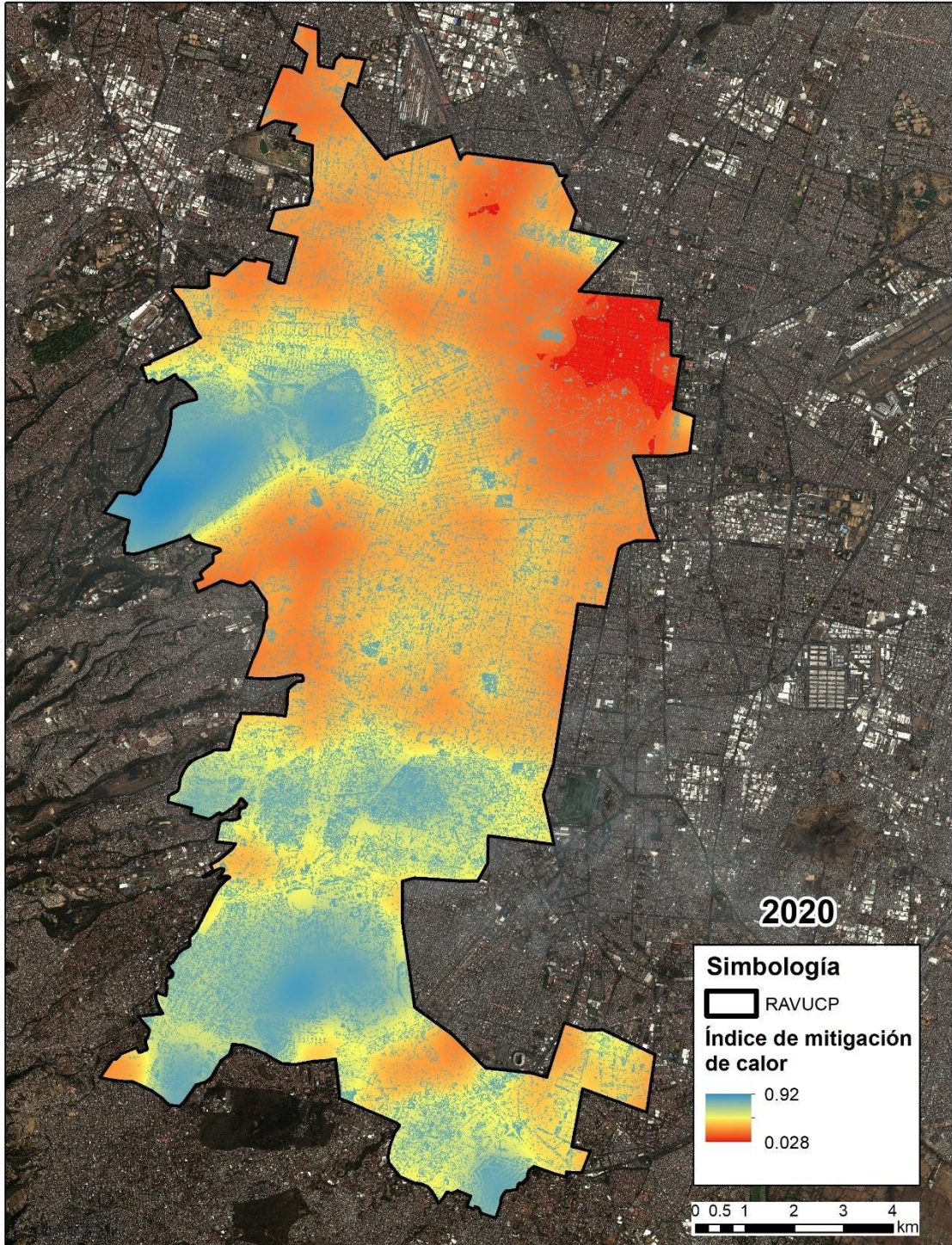


Fig. 3.14 Índice de mitigación de calor de INVEST 2020. (Elaboración propia)

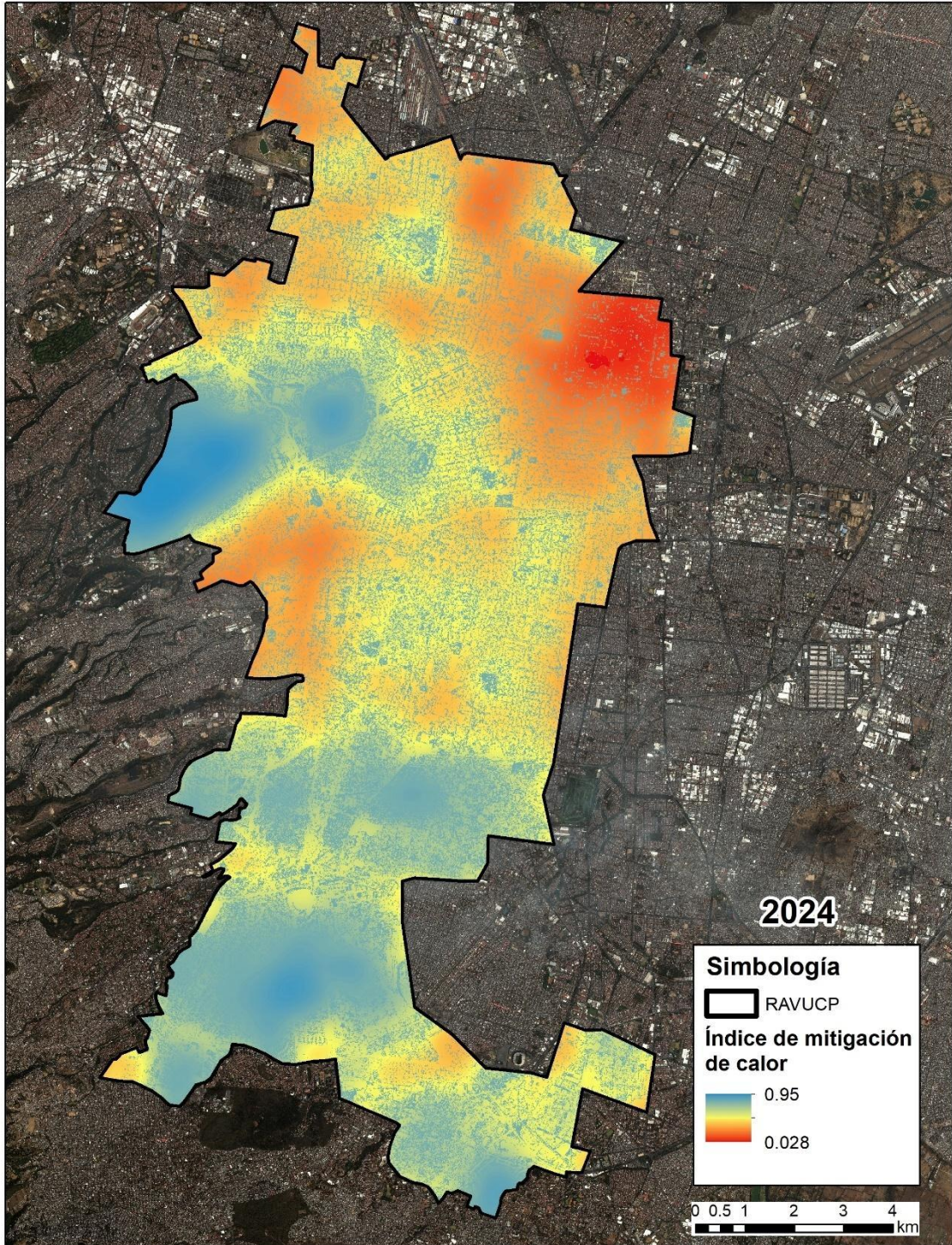


Fig. 3.15 Índice de mitigación de calor de INVEST 2024. (Elaboración propia)

El cambio a través del tiempo del índice de mitigación de calor es mucho más fácil de identificar en los mapas resultantes, en el 2016 se aprecia claramente que los valores más altos del índice de mitigación del calor se encuentran limitados a los parques principalmente mientras que para

2020 y 2024 se aprecia un aumento él los valores altos esto debido a una mayor cantidad de vegetación en las calles.

También se obtuvo el porcentaje de cambios con el transcurso de los años de 2016 a 2020 y 2020 a 2024 lo que permitió identificar donde aumentó (100 a 0.0001), disminuyó (-0.0001 a -100) o permaneció igual (0) el índice de mitigación.

Tabla 3.7 Tabla del porcentaje de cambio del índice de mitigación entre los pares de años. (Elaboración propia)

% de cambio	Área 2016-2020 (ha)	% del Área	Área 2020-2024 (ha)	% del Área
-100 a -75	2.65	0.02	0.0350	0.0002
-75 a -50	167.85	1.12	11.58	0.08
-50 a -25	374.36	2.49	124.92	0.83
-25 a -0.0001	1,079.81	7.19	744.74	4.96
0	276.79	1.84	22.07	0.15
0.0001 a 25	10,095.40	67.26	13,170.80	87.65
25 a 50	1,730.21	11.53	561.32	3.74
50 a 75	1,137.96	7.58	377.87	2.51
75 a 100	145.28	0.97	12.86	0.08
Total	15010.27	100	15,026.13	100

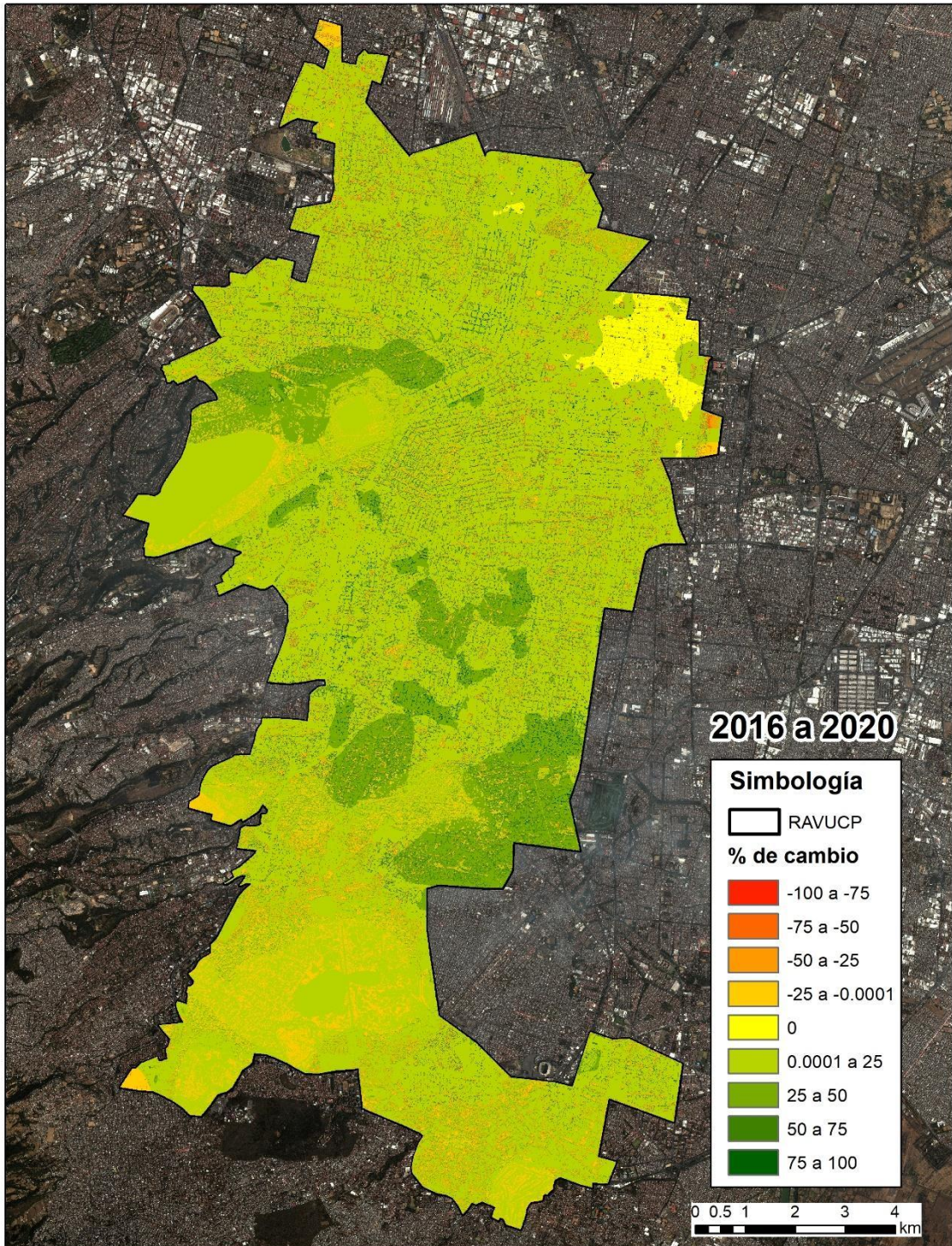


Fig. 3.16 mapa con el porcentaje de cambio del índice de mitigación de 2016 a 2020. (Elaboración propia)

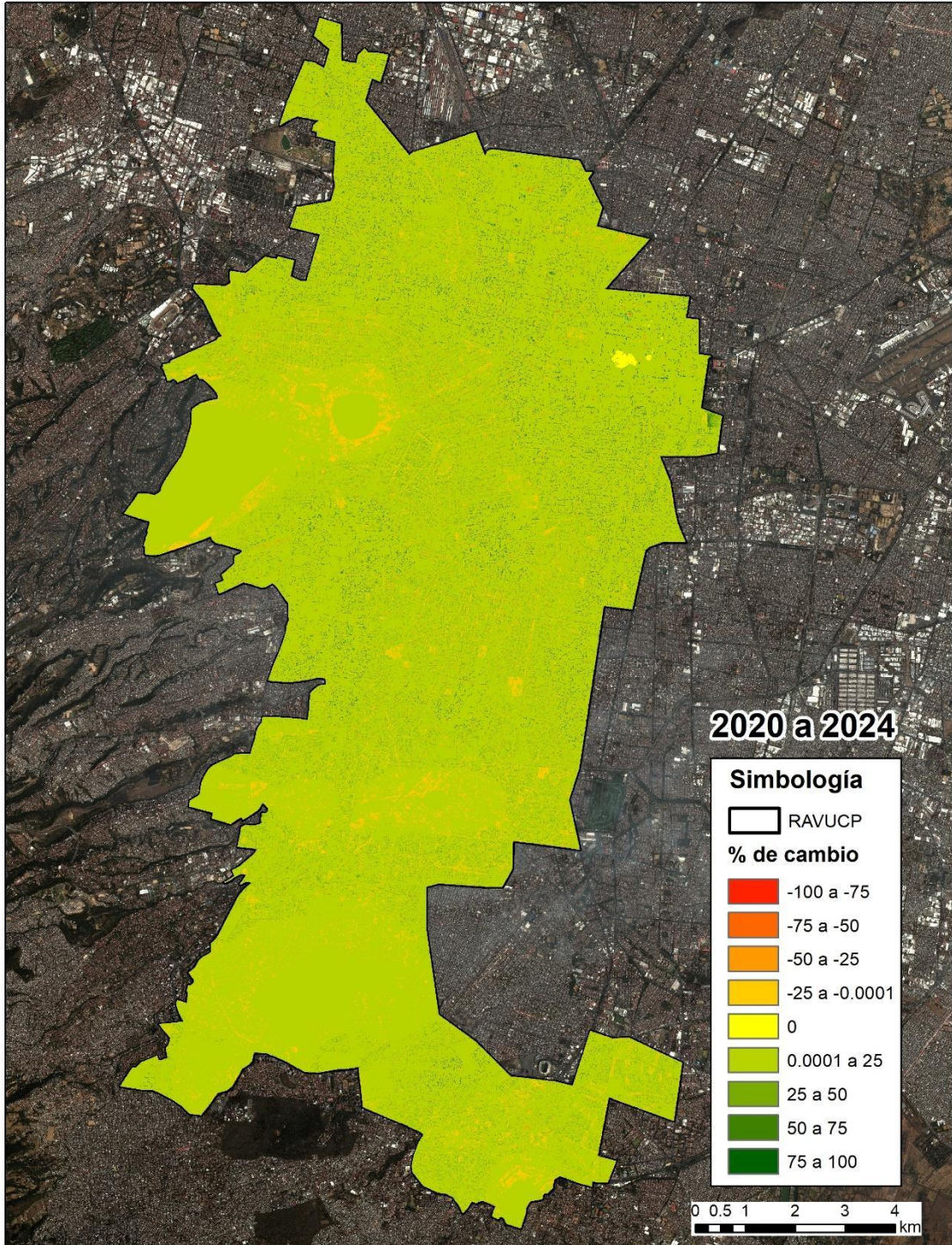


Fig. 3.17 mapa con el porcentaje de cambio del índice de mitigación de 2020 a 2024. (Elaboración propia)

Capítulo 4 Discusión

Áreas verdes

Desde el año 2000, el gobierno de la Ciudad de México ha promovido la realización de diversos inventarios de áreas verdes urbanas lo que ha permitido conocer la superficie de vegetación en la ciudad, para el año 2000, se obtuvo que existían 117.97 km² de áreas verdes contra los 99.22 km² en el 2008, dicha pérdida ocurrió principalmente en espacios verdes privados e informales (Núñez, 2021).

No obstante, en años recientes, la Ciudad de México ha impulsado programas y estrategias para la recuperación de espacios públicos y el fortalecimiento de la infraestructura verde. Un ejemplo de ello es el incremento de 2.9 km² en áreas verdes bajo gestión formal (Núñez, 2021). Según los reportes de la SEDEMA (2024), entre el 2018 a 2024 la superficie de áreas verdes urbanas con el arbolado urbano por habitante pasó de 14.5 m² a 19.4 m², creando y rehabilitando más de 1,598.86 hectáreas y la designación de 8 nuevas áreas de valor ambiental con categoría de bosque urbano.

En el caso del bosque de Chapultepec, una de las áreas verdes más grandes de la RAVUCP, se realizó la reconversión de 11.87 ha de zonas de asfalto y concreto en áreas verdes, lo que coincide con los patrones observados en los mapas de cobertura de suelo generados a partir de la clasificación supervisada. Estos mapas evidencian un incremento en la vegetación, particularmente las calles y avenidas, así como en los valores numéricos obtenidos de las áreas de las tres fechas analizadas (SEDEMA, 2024).

Este aumento en las áreas verde, especialmente cuando implica la conversión de pavimento a vegetación (pasto, arbustos y árboles), puede atribuirse directamente a las políticas de infraestructura verde promovidas por el gobierno, cuyo impacto principal se manifiesta principalmente en los espacios públicos más que en los privados.

Con base en una revisión sistemática de la literatura se ha identificado que la implementación de parques urbanos y corredores verdes puede disminuir la temperatura ambiental en hasta 4°C lo que podría ayudar más a mitigar el efecto de las islas de calor urbano (Bowler et al., 2010). En la RAVUCP las tres principales categorías de áreas verdes son: equipamientos urbanos con vegetación, parques arboledas y alamedas y áreas verdes relacionadas con la red vial (SEDEMA, 2023). Donde se puede destacar el actual enfoque hacia el mejoramiento de estas tres categorías dado por la alta densidad de construcción que existe en la región no permite la creación de nuevas áreas verdes.

De las regiones que conforman la Ciudad de México existe un contraste entre las que tienen una mayor temperatura (Centro, norte y oriente de la ciudad) contra las que tienen un mayor porcentaje de áreas verdes (poniente y sur), la RAVUCP se encuentra en el límite de las que tienen

una mayor temperatura, pero se ve privilegiada respecto a otras al poseer una gran extensión de del infraestructura verde incluyendo algunas de las más icónicas cómo el Bosque de Chapultepec, Ciudad Universitaria y jardines en colonias como Polanco Roma y Condesa.

Esta desigualdad en cuanto a la accesibilidad a las áreas verdes puede acentuar las inequidades socioambientales como: problemas de salud, pérdida del confort, efectos en la salud mental, gentrificación, aumento de precios de vivienda, falta de espacios para la interacción social y actividades recreativas, reducción del ruido y filtrado de contaminantes en el aire y enfriamiento mediante la sombra y la humedad (Kabisch et al., 2015).

Dado que la falta de accesibilidad a áreas verdes puede tener una variedad de efectos negativos en la población, es fundamental impulsar políticas públicas equitativas que prioricen la inclusión social, la asequibilidad de la vivienda y el urbanismo sustentable en los vecindarios, en su defecto mejorar las áreas verdes existentes o impulsar nuevas soluciones como techos verdes o jardines verticales sin importar la zona ni el nivel socioeconómico (Wolch et al., 2014, Nguyen et al., 2021)

Islas de calor

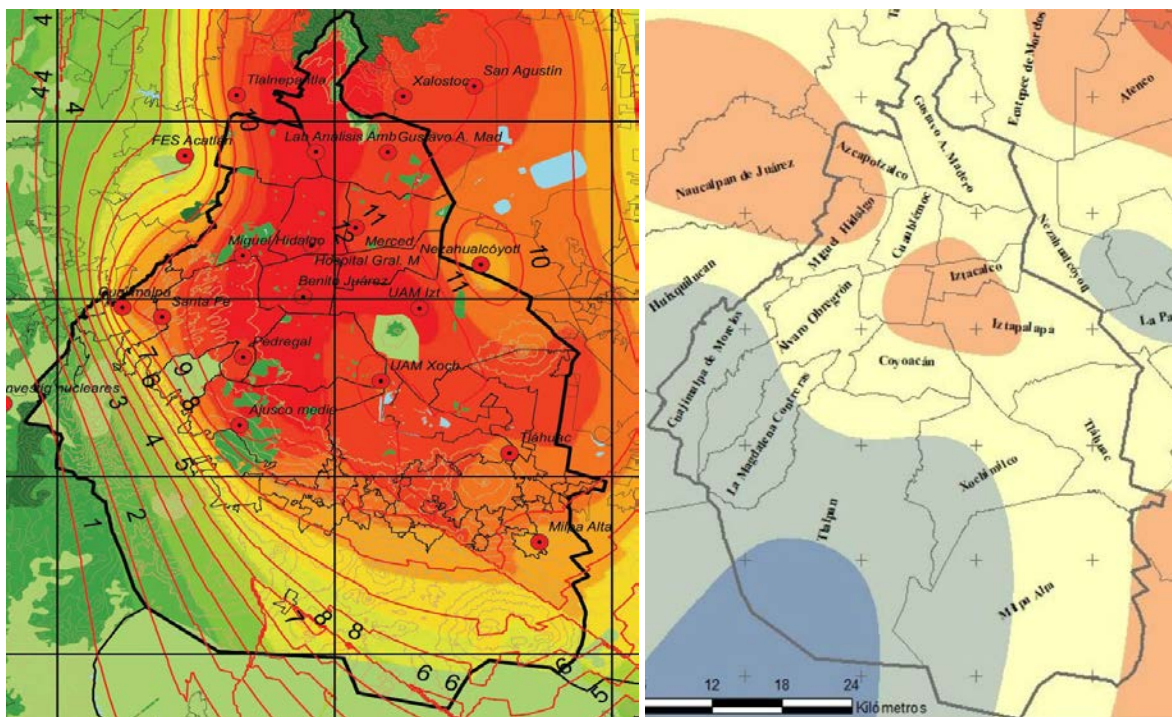


Fig. 4.1 izquierda interpolación de temperaturas para marzo 2019 (Larena, 2020), derecha interpolación de temperatura para Julio de 2020 (Loera Saldivar, 2023)

Los estudios de Larena (2020) y Loera Saldivar (2023) estiman la presencia de islas de calor para la Ciudad de México a partir de las mediciones de temperatura de estaciones meteorológicas. Aunque los valores absolutos de temperatura no son directamente comparables debido a diferencias en las fechas y condiciones climáticas de recolección, sí es posible analizar la distribución espacial de la temperatura.

El análisis de Larena (2020) muestra una isla de calor generalizada sobre el área metropolitana, con un aumento de temperatura hacia la parte central de la Ciudad de México y el oriente de la RAVUCP. En contraste, los resultados Loera Saldivar (2023) evidencian dos islas de calor que coinciden con la RAVUCP, aunque solo una de ellas coincide con los datos de la interpolación de 2016, específicamente en las alcaldías de Iztacalco y poniente de Iztapalapa. Este patrón no se replica en los mapas de 2020 y 2024, lo que sugiere cambios en la dinámica térmica de la ciudad. Cabe resaltar, que como se señaló anteriormente el cambio de superficie pavimentada por área verde del Bosque de Chapultepec puede tener un efecto de enfriamiento más fuerte para la zona, dado que áreas verdes grandes y bien conectadas tienen un efecto de enfriamiento más fuerte en comparación con pequeños parches dispersos. Estos hallazgos refuerzan la importancia de diseñar ciudades con corredores ecológicos continuos en lugar de espacios verdes fragmentados (Li et al., 2012).

Otros estudios, como los de Barrera Alarcón et al. (2022) y Loera Saldivar (2023), han utilizado la temperatura superficial del terreno para determinar las islas de calor urbano, lo que ofrece una mejor resolución espacial. Sin embargo, en este trabajo, las islas de calor se analizaron a partir de la temperatura del aire (fig. 2.14), lo que implica una perspectiva distinta en la caracterización del fenómeno.

Implementación del modelo Urban Cooling

A nivel internacional, Ronchi et al. (2020) aplicaron el modelo Urban Cooling para la ciudad de Milán, obteniendo valores elevados de capacidad de enfriamiento en la periferia de la ciudad, mientras que en la parte interna estos valores fueron considerablemente menores (fig. 4.2). En contraste, los resultados de este estudio muestran que en la RAVUCP las áreas verdes internas presentan valores altos de enfriamiento, generando un fuerte contraste con las áreas circundantes (fig. 3.10, 3.11 y 3.12).

En análisis temporal revela que en 2016 la capacidad de enfriamiento estaba limitada principalmente por los parques urbanos, mientras que en 2020 y 2024 se expandió a calles, avenidas y parques de menor tamaño. Esto sugiere un efecto positivo de la infraestructura verde implementada en la región, lo cual se refleja también en el índice de mitigación de calor. Pese este hallazgo habría que ver que ocurre en las demás regiones de la Ciudad de México, de tal forma que se pueda evaluar si fue un impacto generalizado o sólo en la región que alberga el parque urbano más grande de la Ciudad.

Adicionalmente a este impacto positivo encontrado, hay que explorar que disyuntivas pueden traer estas políticas de adaptación al cambio climático como el plan de infraestructura verde, dado que algunos autores argumentan que éstas pueden generar dinámicas de exclusión y desplazamiento, en la medida en que las inversiones en infraestructura verde elevan los precios

del suelo urbano y restringen el acceso a comunidades de bajos ingresos (Anguelovski et al., 2019).

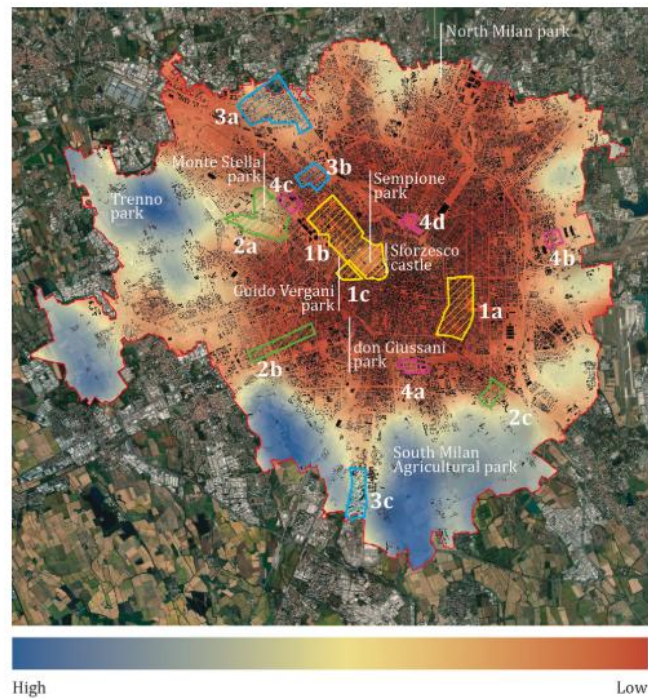


Fig. 4.2 Capacidad de enfriamiento (Ronchi et al., 2020)

Investigaciones previas han aplicado el modelo *Urban Cooling* en diversas ciudades, como Milton Keynes, Bedford y Luton/Dunstable en Inglaterra (Zawadzka et al., 2021) y Busan, Corea del Sur (Chung et al., 2024), obteniendo índices de mitigación de calor similares a los reportados en este estudio. En particular, se observa una fuerte relación entre la presencia de vegetación y los valores de mitigación de calor, patrón que es especialmente evidente en la evolución del índice entre 2016 y 2020.

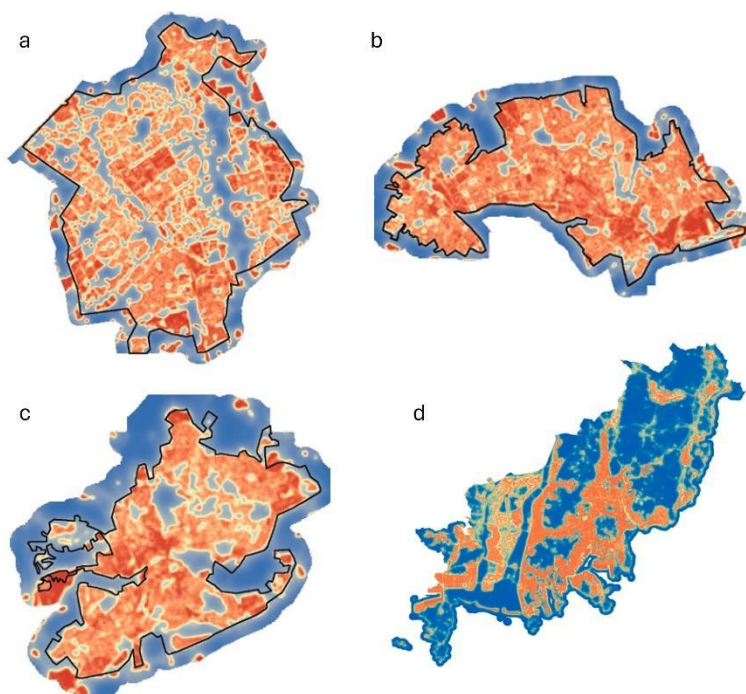


Fig. 4.3 Índice de mitigación de calor a, b y c (Zawadzka et al., 2021), d (Chung et al., 2024).

El análisis de los porcentajes de cambio del índice de mitigación de calor muestra un aumento significativo en la RAVUCP:

- Entre 2016 y 2020, el 87.22% del área experimentó un incremento en la capacidad de mitigación.
- Entre 2020 y 2024, este incremento alcanzó el 93.99%.

Estos cambios reflejan el impacto positivo de las políticas de infraestructura verde, como lo evidencia el aumento en la cobertura vegetal en calles y avenidas, especialmente en zonas circundantes al Bosque de Chapultepec.

Limitaciones

Existen tres principales limitantes que surgieron durante este trabajo:

Estimación de áreas verdes y arbolado urbano:

- Se utilizaron imágenes satelitales de diferentes fuentes (SPOT-6 y Sentinel-2), lo que generó variaciones en la resolución espacial.
- Fue necesario realizar un remuestreo para normalizar la resolución, lo que pudo afectar la precisión en la delimitación de las áreas verdes, especialmente en los bordes del área de interés.

Estimación de islas de calor:

- La cantidad de estaciones meteorológicas en la Ciudad de México es limitada, lo que restringe la precisión del análisis.
- La disponibilidad de datos también afectó la delimitación de las islas de calor, ya que en algunos casos fue necesario utilizar registros de fechas o años distintos.
- Para mejorar la precisión, sería recomendable calcular las islas de calor superficial a partir de imágenes de temperatura de la superficie terrestre e integrar monitoreos regulares para evaluar la efectividad de las estrategias de mitigación térmica (Schwarz et al., 2011).

Cálculo de capacidad de enfriamiento e índice de mitigación de calor:

- Sería útil incorporar información sobre polígonos de infraestructura verde, diferenciando qué porcentaje de cada polígono corresponde a pasto, arbustos o árboles, lo que permitiría evaluar el éxito de los programas de reforestación.
- Contar con proyecciones de infraestructura verde para 2030 y 2050 facilitaría la estimación de escenarios futuros de capacidad de enfriamiento y mitigación de calor.

Perspectivas

Sería de importancia además de determinar el impacto que tienen las áreas verdes en la capacidad de mitigación de islas de calor, analizar la relación que tienen estas áreas en la Ciudad de México con las enfermedades relacionadas con el calor, ya que existen estudios en los que se ha encontrado evidencia de que existen beneficios a la salud asociados con una variedad de cualidades de los espacios verdes, no sólo en una cuestión física, también en la salud emocional y mental, situación vista durante la pandemia de Covid-19 donde las áreas verdes sirvieron para hacer frente al aislamiento (Nguyen et al., 2021).

Evaluar el impacto de incorporar servicios ecosistémicos en el diseño y fortalecimiento de áreas verdes es esencial para mejorar los entornos urbano y además obtener un beneficio más allá de los ya establecidos mediante la mitigación de las islas de calor, la correcta incorporación de servicios ecosistémicos ayuda a mejorar la calidad de vida de los residentes mejorando la belleza estética, proporcionando lugares de recreación y mejorando la calidad del aire y también ayuda a abordar cuestiones ambientales como el manejo de agua pluviales mediante humedales artificiales y mejorar la biodiversidad al generación de nuevos hábitats. (Robert I. McDonald, 2015)

Capítulo 5 Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente proyecto de investigación revelan que se cumplió el objetivo general de evaluar los cambios en el potencial de enfriamiento urbano de las áreas verdes y arbolado urbano en la Región de Áreas Verdes Urbanas Centro Poniente en el contexto del plan maestro de infraestructura verde de la CDMX (2018-2024), todo ello mediante percepción remota y análisis geoespacial.

Se encontró que las áreas verdes urbanas y arbolado urbano demostraron ser una herramienta eficaz para mitigar el efecto de las islas de calor, reduciendo significativamente las temperaturas locales en comparación con las áreas urbanizadas circundantes. Esta capacidad de enfriamiento varió según la densidad, el tipo y la ubicación de la vegetación, lo que resalta la importancia de un diseño estratégico en su distribución.

Los análisis comparativos entre 2016, 2020 y 2024 reflejaron un aumento en la capacidad de enfriamiento derivado de las intervenciones planificadas bajo el marco del plan maestro de infraestructura verde. Este resultado subraya la relevancia de la continuidad y el fortalecimiento de políticas públicas enfocadas en la revegetación urbana.

El modelo Urban Cooling de InVest es una herramienta sencilla de utilizar que permite obtener resultados de alta calidad como lo son la capacidad de enfriamiento, el índice de mitigación de calor e incluso la temperatura del aire. Aunque el modelo aplicado demostró ser robusto en la estimación del impacto de las áreas verdes, futuros estudios deberían considerar factores adicionales, como escenarios de crecimiento urbano proyectado y cambio climático así como la interacción con otras variables climáticas, urbanas e indicadores de vulnerabilidad social.

Aunque existe una gran cantidad de estudios y trabajos respecto al fenómeno de islas de calor en la Ciudad de México principalmente se encuentran enfocados a la delimitación, estudio de causas y afectaciones, algunos si mencionan el impacto que tiene las áreas verdes para mitigar el efecto de las islas de calor mas no se concentran en calcular la capacidad de enfriamiento a mayor escala ni evalúan el cambio que ha existido a lo largo del tiempo de áreas verdes de la Ciudad de México. Estos análisis subrayan en la necesidad de focalizar o priorizar zonas estratégicas para incrementar capacidad de enfriamiento a través de en zonas con baja índice de mitigación

índice de ilustraciones

<i>Fig. 1.1 Dinámica de crecimiento urbano: mancha urbana de ciudad pequeña, ciudad mediana, metropolización y fortalecimiento de subcentros urbanos y decaimiento del centro histórico (Bazant S., 2010).</i>	5
<i>Fig. 1.2 Clasificación de las dos capas de la atmosfera urbana (modificado de Stewart, 2011).</i>	13
<i>Fig. 1.3 Temperatura de la superficie de los materiales expuestos en un día (modificado de Rivera Rivera, 2012).</i>	15
<i>Fig. 1.4 Vistas hemisféricas del cielo desde las afueras de la ciudad, calle residencial arbolada y centro de la ciudad(modificado de Stewart, 2011).</i>	15
<i>Fig. 2.1 Las 8 regiones de infraestructura verde de la Ciudad de México. 1 Región de Áreas Verdes Urbanas Norte, 2 Región de Barrancas Urbanas, 3 Región de Áreas Verdes Urbanas Centro Poniente, 4 Región De Áreas Verdes Urbanas Centro Oriente, 5 Región de Humedales, 6 Región de Áreas Verdes Urbanas Oriente, 7 Región de Transición Rural-urbana y 8 Región de Bosques Naturales.</i>	27
<i>Fig. 2.2 Región de Áreas Verdes Urbanas Centro Poniente (RAVUCP) con las áreas verdes de la CDMX</i>	28
<i>Fig. 2.3 Categorías y distribución relativa de las áreas verdes en la RAVUCP (Gestión Integral Forestal, 2020).</i>	29
<i>Fig. 2.4 Diagrama de flujo que ilustra el proceso para obtener la cobertura de suelo</i>	30
<i>Fig. 2.5 Polígonos de calibración para la clasificación de máxima verosimilitud</i>	32
<i>Fig. 2.6 Resultados obtenidos a partir de las pruebas para determinar cuál de los índices identifica mejor la vegetación (el color rojo corresponde con lo urbano)</i>	33
<i>Fig. 2.7 Resultados obtenidos a partir de las pruebas para determinar cuál de los índices identifica mejor la vegetación</i>	34
<i>Fig. 2.8 Capa de manzanas y vialidades pavimentadas (izquierda) y altura de la vegetación y la parte urbana (derecha).</i>	35
<i>Fig. 2.9 Resta de los rasters del Modelo Digital de Superficie menos el Modelo Digital del Terreno para obtener la altura de edificios y vegetación dentro de la RAVUCP</i>	35
<i>Fig. 2.10 Código utilizado para realizar la clasificación en la capa producto de la combinación de las tres capas (2016).</i>	37
<i>Fig. 2.11 Comparativa de una imagen satelital (arriba) con la clasificación obtenida (abajo)</i>	38
<i>Fig. 2.12 Ráster de entrada y de salida después de utilizar el filtro mayoritario para reducir el ruido de la imagen (ESRI, 2016).</i>	38
<i>Fig. 2.13 Antes y después de usar el filtro mayoritario para corregir el efecto sal-pimientas de una capa</i>	39
<i>Fig. 2.14 La temperatura superficial para mayo del año 2020 y la RAVUCP</i>	40
<i>Fig. 2.15 Islas de calor urbano con información del año 2016 para el día durante la época de verano</i>	41
<i>Fig. 2.16 Ubicación de las estaciones del programa de estaciones meteorológicas del bachillerato universitario (PEMBU)</i>	42
<i>Fig. 2.17 Interpolación de las temperaturas obtenidas de las estaciones meteorológicas de la UNAM en la Ciudad de México para el mes de mayo del 2010 y su ubicación respecto las alcaldías de la CDMX</i>	46
<i>Fig. 2.18 Mapa de índice de mitigación de calor (arriba) y mapa de la capacidad de enfriamiento (abajo)</i>	49
<i>Fig. 2.19 Diagrama de flujo que ilustra el proceso de las simulaciones a realizar en INVEST</i>	50
<i>Fig. 3.1 Cobertura de suelo de la RAVUCP para 2016</i>	52
<i>Fig. 3.2 Cobertura de suelo de la RAVUCP para 2020</i>	53
<i>Fig. 3.3 Cobertura de suelo de la RAVUCP para 2024</i>	54
<i>Fig. 3.4 Interpolación de las temperaturas a partir de los datos de las estaciones meteorológicas 2016</i>	57
<i>Fig. 3.5 Interpolación de las temperaturas a partir de los datos de las estaciones meteorológicas 2020</i>	58
<i>Fig. 3.6 Interpolación de las temperaturas a partir de los datos de las estaciones meteorológicas 2024</i>	59
<i>Fig. 3.7 Temperatura del aire generada por el procesamiento de INVEST 2016</i>	61
<i>Fig. 3.8 Temperatura del aire generada por el procesamiento de INVEST 2020</i>	62
<i>Fig. 3.9 Temperatura del aire generada por el procesamiento de INVEST 2024</i>	63

<i>Fig. 3.10 Capacidad de enfriamiento de INVEST 2016</i>	65
<i>Fig. 3.11 Capacidad de enfriamiento de INVEST 2020</i>	66
<i>Fig. 3.12 Capacidad de enfriamiento de INVEST 2024</i>	67
<i>Fig. 3.13 Índice de mitigación de calor de INVEST 2016</i>	68
<i>Fig. 3.14 Índice de mitigación de calor de INVEST 2020</i>	69
<i>Fig. 3.15 Índice de mitigación de calor de INVEST 2024</i>	70
<i>Fig. 3.16 mapa con el porcentaje de cambio del índice de mitigación de 2016 a 2020.</i>	72
<i>Fig. 3.17 mapa con el porcentaje de cambio del índice de mitigación de 2020 a 2024.</i>	73
<i>Fig. 4.1 izquierda interpolación de temperaturas para marzo 2019 (Larena, 2020), derecha interpolación de temperatura para Julio de 2020 (Loera Saldivar, 2023)</i>	75
<i>Fig. 4.2 Capacidad de enfriamiento (Ronchi et al., 2020)</i>	77
<i>Fig. 4.3 Índice de mitigación de calor a, b y c (Zawadzka et al., 2021), d (Chung et al., 2024)</i>	78

índice de tablas

<i>Tabla 1.1 Características de la ciudad que fomentan la formación de islas de calor (modificado de Li, 2016).</i>	13
<i>Tabla 2.1 Tabla con los índices de vegetación y su uso por el cual son considerados para esta metodología (Han et al., 2022; Hashim et al., 2019).</i>	31
<i>Tabla 2.2 Tabla de las categorías utilizados para clasificar la cobertura de suelo de la RAVUCP y los parámetros utilizados</i>	36
<i>Tabla 2.3 Datos puntuales de las estaciones meteorológicas de la UNAM para el 15 de mayo del 2016</i>	43
<i>Tabla 2.4 Datos puntuales de las estaciones meteorológicas de la UNAM para el 15 de mayo del 2020.</i>	44
<i>Tabla 2.5 Datos puntuales de las estaciones meteorológicas de la UNAM para el 15 de mayo del 2024.</i>	44
<i>Tabla 2.6 Tabla biofísica de valores asociados a la cobertura de la superficie</i>	48
<i>Tabla 3.1 Tablas con las áreas por tipo de superficie y por año</i>	51
<i>Tabla 3.2 Tablas con las áreas en porcentaje por tipo de superficie y por año</i>	51
<i>Tabla 3.3 Matriz de confusión para obtener la precisión 2016</i>	55
<i>Tabla 3.4 Matriz de confusión para obtener la precisión 2020</i>	55
<i>Tabla 3.5 Matriz de confusión para obtener la precisión 2024</i>	55
<i>Tabla 3.6 Tabla con las áreas de la capacidad de enfriamiento por categoría</i>	64
<i>Tabla 3.7 Tabla del porcentaje de cambio del índice de mitigación entre los pares de años</i>	71

Bibliografía

- AbdElfattah AboElata, A. A. (2017). Study the Vegetation as Urban Strategy to Mitigate Urban Heat Island in Mega City Cairo. *Procedia Environmental Sciences*, 37, 386–395. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.004>
- Aguayo, M., Pauchard, A., Azócar, G., & Parra, O. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural*, 82(3), 361–374. <https://doi.org/10.4067/s0716-078x2009000300004>
- Aguilar, A. G. (1999). Los asentamientos humanos y el cambio climático en México. Un escenario futuro de vulnerabilidad regional. *México: Una Visión Hacia El Siglo XXI: El Cambio Climático En México, November*, 171–194. http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/libros/cambio_climatico/asentaminetos.pdf
- Angel, L., Ramirez, A., & Dominguez, E. (2010). Isla De Calor Y Cambios Espacio-Temporales De La Temperatura En La Ciudad De Bogotá. *Revista Academica Colombiana de Ciencias*, 34, 174–182.
- Anguelovski, I., Connolly, J. J., Pearsall, H., Shokry, G., Checker, M., Maantay, J., ... & Roberts, J. T. (2019). Why green “climate gentrification” threatens poor and vulnerable populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(52), 26139–26143.
- Aragón, J. A., Rodríguez, E. D., Varon, G. A., & Sánchez, G. A. (2020). Análisis de islas de calor por medio de imágenes satelitales y sistemas de información geográficos en el área urbana de la sabana de bogotá. *Geographicalia*, 72, 39–64.
- Aragoneses de la Rubia, E. (2020). Characterization of the Urban Heat Island in the Uam Campus Using Remote Sensing. *GeoFocus*, 2020(26), 43–67. <https://doi.org/10.21138/GF.678>
- Araiza-Olivares, G. A. (2022). La isla de calor en la Ciudad de México: Un análisis decadal (1950-2010). *Revista Geográfica de América Central*, 2(69), 415–436. <https://doi.org/10.15359/rgac.69-2.15>
- Arku, R. (2021). *Infill Planner: A geo-questionnaire to gather public input on infill developments*. University of Waterloo.
- Barrera Alarcón, I. G., Caudillo Cos, C. A., Medina Fernández, S. L., Ávila Jiménez, F. G., & Montejano Escamilla, J. A. (2022). La isla de calor urbano superficial y su manifestación en la estructura urbana de la Ciudad de México. *Revista De Ciencias Tecnológicas*, 5(3), 312–330. <https://doi.org/10.37636/recit.v53312330>
- Bartesaghi Koc, C., Osmond, P., & Peters, A. (2018). Evaluating the cooling effects of green infrastructure: A systematic review of methods, indicators and data sources. *Solar Energy*, 166(October 2017), 486–508. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.008>
- Bazant S., J. (2010). Expansión urbana incontrolada y paradigmas de la planeación urbana. *Espacio Abierto*, 19(3), 475–503.
- Benavides Ballesteros, H. O., & León Aristizabal, G. E. (2007). Información tecnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climatico. *NOTA TÉCNICA DEL IDEAM*, 08(Información tecnica sobre gases

de efecto invernadero y el cambio climático), 35–47.

- Beuf, A. (2012). Concepción de centralidad urbana y planeación del crecimiento urbano en la Bogotá de siglo XX. *XII Coloquio Internacional de Geocrítica*, 1–21.
- Caciano, R. T., González, M. R., Ramírez, G. D., Estrada, J., & Cerano, J. (2013). Análisis Sobre Cambio De Uso De Suelo En Dos Escalas De Trabajo. *Revista Terra Latinoamericana*, 31(4), 339–346.
- Camagni, R., Cristina, M., & Rigamonti, P. (2002). Urban mobility and urban form: the social and environmental costs of different patterns of urban expansion. *Ecological Economics*, 40, 199–216.
- Cavazos, T., Salinas, J. A., Martínez, B., Colorado, G., de Grau, P., Prieto González, R., Conde Álvarez, A. C., Quintanar Isaías, A., Santana Sepúlveda, J. S., Romero Centeno, R., Maya Magaña, M. E., Rosario de La Cruz, J. G., Ayala Enríquez, M. del R., Carrillo Tlazazanatza, H., Santiesteban, O., & Bravo, M. E. (2013). Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional. *Centro de Ciencias de La Atmósfera, UNAM, January*, 1–150.
- Chung, J., Kim, J., & Sung, K. (2024). Analysis of Heat Mitigation Capacity in a Coastal City using InVEST Urban Cooling Model. *Sustainable Cities and Society*, 113(November 2023), 105669. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105669>
- Córdova, K. (2011). Heat Island Impacts , and Urban Heat Islands in the Environment and Human Health . Comparative Seasonal Analysis : Caracas , October 2009 , March 2010. *Revista Terra*, 27(42), 95–122.
- Cristina, S., Gómez, Z., La, R., Calor, I. De, & Icu, U. (2023). El impacto de la arborización como estrategia de mitigación de la isla de calor urbana en el Caribe colombiano. *Arquitectura y Urbanismo*, 44(2), 34–41.
- Cruz-Bello, G. M., Galeana-Pizaña, J. M., & González-Arellano, S. (2023). Urban growth in peri-urban, rural and urban areas: Mexico City. *Buildings and Cities*, 4(1), 1–16. <https://doi.org/10.5334/bc.230>
- Cuevas, M. L., Garrido, A., Pérez Damián, J. L., & Iura Gonzalez, D. (2009). Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural. In *Las cuencas hidrográficas de México* (pp. 96–103).
- Cui, Y. Y., & De Foy, B. (2012). Seasonal variations of the urban heat island at the surface and the near-surface and reductions due to urban vegetation in Mexico City. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(5), 855–868. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0104.1>
- Delgado Ramos, G. C., Campos Chávez, C., & Rentería Juárez, P. (2015). Cambio climático y el metabolismo urbano de las Megaurbes Latinoamericanas. *Revista Hábitat Sustentable*, 2(1), 2–25.
- Díaz Cordero, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*, 37(2), 227–240. <http://repositoriobiblioteca.intec.edu.do/bitstream/handle/123456789/1392/CISO20123702-227-240.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ley General de Asentamientos Humanos, Diario oficial de la federación DOF. 26 de mayo de 1976 (México)
- Farhadi, H., Faizi, M., & Sanaieian, H. (2019). Mitigating the urban heat island in a residential area in Tehran: Investigating the role of vegetation, materials, and orientation of buildings. *Sustainable Cities and Society*, 46(June 2018), 101448. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101448>

- Fernández, J. L. U. (2013). El Cambio Climático: sus causas y efectos medioambientales. *Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid*, 50, 71–98.
- Gallo, K. P., McNab, A. L., Karl, T. R., Brown, J. F., Hood, J. J., & Tarpley, J. D. (1993). The Use of NOAA AVHRRData for Assessment of the Urban Heat Island Effect. *Journal of Applied Meteorology*, 32, 899–908.
- García-Cueto, O. R., Jáuregui-Ostos, E., Toudert, D., & Tejeda-Martinez, A. (2007). Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., México and its relationship with land use. *Atmosfera*, 20(2), 111–131.
- Gestión Integral Forestal. (2020). *Plan Maestro De Infraestructura Verde de la CDMX*.
- Gobierno de la Ciudad de México. (2019). *Programa Ambiental y de Cambio Climático para la Ciudad de México 2019 – 2024*. 44.
- Gobierno del Distrito Federal. (2017). *Plan verde Ciudad de México*.
- Gobierno del Distrito Federal. (2011). *Plan Verde de la Ciudad de México Cuatro años de avances*.
- Gobierno del Distrito Federal. (2012). *Plan Verde de la Ciudad de México Cinco años de avances*.
- González Elizondo, M., Jurado Ybarra, E., González Elizondo, S., Aguirre Calderón, Ó., Jiménez Pérez, J., & Nívar Cháidez, J. (2003). Cambio climático mundial : origen y consecuencias. *Ciencia UANL*, 6(3).
- Graizbord, B., González Granillo, J. L., & López Ibarra, O. (2024). Vulnerabilidad y riesgo climático. Los retos de la Ciudad de México hacia el primer tercio del siglo XXI. *Investigaciones Geográficas*, 114. <https://doi.org/10.14350/rig.60844>
- Hamel, P., Guerry, A. D., Polasky, S., Han, B., Douglass, J. A., Hamann, M., Janke, B., Kuiper, J. J., Levrel, H., Liu, H., Lonsdorf, E., McDonald, R. I., Nootenboom, C., Ouyang, Z., Remme, R. P., Sharp, R. P., Tardieu, L., Viguié, V., Xu, D., ... Daily, G. C. (2021). Mapping the benefits of nature in cities with the InVEST software. *Npj Urban Sustainability*, 1(1). <https://doi.org/10.1038/s42949-021-00027-9>
- Hernandez, F. (2014). ABORDAJE TEÓRICO DE LA RENOVACIÓN URBANA COMO PROCESO DE TRANSFORMACIÓN EN LA ESTRUCTURA URBANA. APLICACIÓN EN EL CASCO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE MENDOZA, ARGENTINA. *Revista Del Departamento de Geografía. FFyH – UNC – Argentina*, 2(2), 49 – 69.
- Hernández Godínez, T. Y. (2019). *Caracterización de los efectos de la isla de calor en la delegación Venustiano Carranza, Ciudad de México*. http://geografiahumana.izt.uam.mx/wp-content/uploads/2018/08/3_Tania_Yanet_Hernandez_Godinez.pdf
- Hulley, M. E. (2012). The urban heat island effect: Causes and potential solutions. *Metropolitan Sustainability: Understanding and Improving the Urban Environment*, 79–98. <https://doi.org/10.1533/9780857096463.1.79>
- INEGI. (2021). Comunicado de prensa Núm. 24/21. En México somos 126 014 024 habitantes: Censo de Población y Vivienda 2020. *Censo De Población Y Vivienda 2020*, 1–3. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/EstSociodemo/ResultCenso20_20_Nal.pdf

- Janoschka, M., & Sequera, J. (2014). Procesos de gentrificación y desplazamiento en America Latina. *Desafíos Metropolitanos. Un Diálogo Entre Europa y América Latina, 2014*, 82–104. http://contested-cities.net/wp-content/uploads/2014/07/2014CC_Janoschka_Sequera_Desplazamiento_AL.pdf
- Jauregui, E. (1997). Heat Island Development In Mexico City. *Atmospheric Environment, 31*(22), 3821–3831.
- Jáuregui, E. (2005). Possible impact of urbanization on the thermal climate of some large cities in México. *Atmosfera, 18*(4), 249–252.
- Jáuregui Ostos, E., & Luyando, E. (1998). Long-term association between pan evaporation and the urban heat island in Mexico City. *Atmósfera, 11*(1), 45–60.
- José, J., & Chaparro, G. (2009). Planeación urbana en México: Un análisis crítico sobre su proceso de evolución. *Urbano, 12*(19), 47–63.
- Kabano, P., Lindley, S., & Harris, A. (2021). Evidence of urban heat island impacts on the vegetation growing season length in a tropical city. *Landscape and Urban Planning, 206*(November 2020), 103989. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103989>
- Kabisch, N., Qureshi, S., & Haase, D. (2015). Human–environment interactions in urban green spaces—A systematic review of contemporary issues and prospects for future research. *Environmental Impact Assessment Review, 50*, 25–34.
- Kadaverugu, R., Gurav, C., Rai, A., Sharma, A., Matli, C., & Biniwale, R. (2021). Quantification of heat mitigation by urban green spaces using InVEST model—a scenario analysis of Nagpur City, India. *Arabian Journal of Geosciences, 14*(2). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06380-w>
- Li, X., Zhou, W., Ouyang, Z., Xu, W., & Zheng, H. (2012). Spatial pattern of greenspace affects land surface temperature: Evidence from the heavily urbanized Beijing metropolitan area, China. *Landscape Ecology, 27*(6), 887–898.
- Larena, I. (2020). *La Dinámica De La Isla De Calor Urbana En Ciudad De México* [Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/64053/>
- Larena, I. (2022). Dinámica espacio-temporal de la isla de calor urbana en la Ciudad de México. *Urbe. Arquitectura, Ciudad y Territorio, 15*, 3–18. <https://doi.org/10.29393/ur15-1deil10001>
- Levy, J. M. (2015). Contemporary Urban Planning. *Contemporary Urban Planning*. <https://doi.org/10.4324/9781315664453>
- Li, H. (2016). *Pavement Materials for Heat Island Mitigation*. Butterworth-Heinemann.
- Loera Saldivar, M. C. (2023). *Comparación de técnicas de percepción remota para la detección de islas de calor en la Ciudad de México y zona conurbada a partir de imágenes satelitales Landsat 8 OLI y datos puntuales*.
- López González, F. M., Navarro Navarro, L. A., Díaz Caravantes, R. E., & Navarro-Estupiñán, J. (2021a). Cobertura vegetal y la distribución de islas de calor/oasis urbanos en Hermosillo, Sonora Vegetation cover and urban heat islands/oasis distribution in Hermosillo City, Sonora. *Revista Internacional de*

Fronteras, Territorios y Regiones, 33, 1–32.

- López González, F. M., Navarro Navarro, L. A., Díaz Caravantes, R. E., & Navarro-Estupiñán, J. (2021b). *Cobertura vegetal y la distribución de islas de calor/oasis urbanos en Hermosillo, Sonora* *Vegetation cover and urban heat islands/oasis distribution in Hermosillo City, Sonora* Francisco Martín López González, 1 Luis Alan Navarro Navarro, 2 Rolando Enrique. 33, 1–32.
- Manzanilla Quiñones, U. (2023). Estimación de islas de calor urbanas en la ciudad de Uruapan, Michoacán, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(1), 1–9. <https://doi.org/10.19136/era.a10n1.3495>
- Mariani, L., Parisi, S. G., Cola, G., Laforteza, R., Colangelo, G., & Sanesi, G. (2016). Climatological analysis of the mitigating effect of vegetation on the urban heat island of Milan, Italy. *Science of the Total Environment*, 569–570, 762–773. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.111>
- Marincic, I. (2022). Una revisión sobre la isla de calor urbana y sus particularidades en zonas desérticas de México. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 6(12), 9–25. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i12.196>
- Martínez Martínez, J. (2014). Estudio de la isla de calor de la ciudad de Alicante. *Investigaciones Geográficas*, 62, 83. <https://doi.org/10.14198/ingeo2014.62.06>
- Martínez, P., & Patiño, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 3(1), 5–20.
- Robert I. McDonald. (2015). *Conservation for Cities: How to Plan and Build Natural Infrastructure*. Island Press.
- Medina-Fernández, S. L., Núñez, J. M., Barrera-Alarcón, I., & Perez-DeLaMora, D. A. (2023). Surface Urban Heat Island and Thermal Profiles Using Digital Image Analysis of Cities in the El Bajío Industrial Corridor, Mexico, in 2020. *Earth (Switzerland)*, 4(1), 93–150. <https://doi.org/10.3390/earth4010007>
- Méndez-Pérez, I. R., Tejeda-Martínez, A., Lino-Solano, J. J., & Blanco, C. O. R. (2023). Vigencia de la detección de la isla de calor urbana mediante recorridos dos ejemplos en el oriente de México. *Investigaciones Geográficas*, 112, 1–15. <https://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/60729>
- Mercado, L. (2022). Mitigación y adaptación al efecto de isla de calor urbana de clima cálido seco El caso de Hermosillo, Sonora. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 11, 85–110. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i11.187>
- Morales Méndez, C., Madrigal Uribe, D., & González Becerril, L. (2007). Isla de calor en Toluca, México. *CIENCIA Ergo-Sum*, 14(3), 307–316. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10414308>
- Nguyen, P. Y., Astell-Burt, T., Rahimi-Ardabili, H., & Feng, X. (2021). Green space quality and health: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21). <https://doi.org/10.3390/ijerph182111028>
- Núñez, J. M. (2021). Análisis espacial de las áreas verdes urbanas de la Ciudad de México. *Economía, Sociedad y Territorio*, 21(67), 803–833.

- Oficina de Cambio Climático, & Ministerio del Medio Ambiente. (2014). *Plan Nacional de Adaptación al cambio Climático*.
- Onishi, A., Cao, X., Ito, T., Shi, F., & Imura, H. (2010). Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots. *Urban Forestry and Urban Greening*, 9(4), 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2010.06.002>
- P. da Cunha, J. M., & Rodríguez Vignoli, J. (2009). Crecimiento urbano y movilidad en América Latina. *Revista Latinoamericana de Población*, 3(4–5), 27–64. <https://doi.org/10.31406/relap2009.v3.i1.n4-5.1>
- Pardo Buendía, M. (2007). El impacto social del cambio climático. *Panorama Social*, 5, 22–35.
- Pineda Jaimes, N. B., Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., & Plata Rocha, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, 69, 33–52. <https://doi.org/10.14350/rig.18003>
- Ramírez, L., & Pértile, V. C. (2013). Cambio de uso del suelo y tendencias de la expansión urbana entre 1990 y 20130 en Juan José Castelli y Villa Ángela, Chaco, Argentina. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*, 5(1), 194–216.
- Reyes-Escobedo, M., & Aguiluz-León, J. (2023). Factores de influencia para formación de islas de calor en la Zona Metropolitana de Querétaro. *Legado de Arquitectura y Diseño*, 18(33), 7. <https://doi.org/10.36677/legado.v18i33.17416>
- Rivera Rivera, A. L. (2012). *Urban heat islands in Monterrey, Mexico using remote sensing imagery and geographic information systems analysis* [Instituto tecnológico y de estudios superiores de Monterrey]. [https://rei.iteso.mx/bitstream/handle/11117/1630/CASO DE CIBERTERAPIA.pdf;jsessionid=118A1EDC8F32D4BF6E5B250CF0A64863?sequence=2](https://rei.iteso.mx/bitstream/handle/11117/1630/CASO_DE_CIBERTERAPIA.pdf;jsessionid=118A1EDC8F32D4BF6E5B250CF0A64863?sequence=2)
- Romero, H. (2004). Patrones y factores de crecimiento espacial de la ciudad de Santiago de Chile y sus efectos en la generación de islas de calor urbanas de superficie. *Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología*.
- Ronchi, S., Salata, S., & Arcidiacono, A. (2020). Which urban design parameters provide climate-proof cities? An application of the Urban Cooling InVEST Model in the city of Milan comparing historical planning morphologies. *Sustainable Cities and Society*, 63(April), 102459. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102459>
- Sánchez Vargas, A., García, C. G., & Estrada Porrua, F. (2011). Cambio climático y pobreza en el Distrito Federal. *Investigacion Economica*, 70(278), 45–74.
- Schramek, C., & Harmeling, S. (2020). G20 and climate change time to lead for a safer future. *CARE Climate Change*, 1–30. <https://doi.org/10.11647/obp.0212.01>
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2019). *Programa Ambiental Y De Cambio Climático Para La Ciudad De México 2019-2024*. <https://www.jefaturadegobierno.cdmx.gob.mx/storage/app/media/pdf-programa-de-medio->

- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2021). *Estrategia Local de Acción Climática 2021-2050 / Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2021-2030*. http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/cambioclimaticocdmx/images/biblioteca_cc/Estrategia-Local-de-Accion-Climatica-de-la-Ciudad-de-Mexico-2014-2020.pdf
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2023). Programa especial de la red de infraestructura verde de la Ciudad de México .
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2024). Sexto Informe de Gobierno (Vol. 1).
- Soberón Forsberg, V. S., & Obregón Párraga, E. (2016). Identificación De Islas De Calor En La Ciudad De Lima Metropolitana Utilizando Imágenes Del Satélite Landsat 5Tm. *Anales Científicos*, 77(1), 34. <https://doi.org/10.21704/ac.v77i1.475>
- Sosa, F. (2015). Política del cambio climático en México: avances, obstáculos y retos. *Realidad , Datos y Espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 6, 20. http://www.inegi.org.mx/rde/rde_15/doctos/rde_15_art1.pdf
- Soto Montes de Oca, G. ., Herrera Pantoja, M., Soto Montes de Oca, A., Vilchis Carmona, M. E., & Archundia Silva, M. (2009). Estudios Sobre el Impacto del Cambio Climático en el Servicio de Abasto de Agua de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Estudios Realizados En El Centro Virtual de Cambio Climático En La Ciudad de México., Cvcccm*, 23–42. http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/sis_admin/archivos/sintesis_1a_fase.pdf
- Stewart, I. D. (2011). Redefining the Urban Heat Island. *October, October*, 1–352. <https://circle.ubc.ca/handle/2429/38069>
- Susca, T., Gaffin, S. R., & Dell’Osso, G. R. (2011). Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*, 159(8–9), 2119–2126. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.03.007>
- Velázquez, A., Bocco, G., & Siebe, C. (2014). Cambio de Uso del Suelo. *Red Temática de CONACYT Sobre Medio Ambiente y Sustentabilidad*.
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Wolch, J. R., Byrne, J., & Newell, J. P. (2014). Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities 'just green enough'. *Landscape and Urban Planning*, 125, 234-244.
- Zardo, L., Geneletti, D., Pérez-Soba, M., & Van Eupen, M. (2017). Estimating the cooling capacity of green infrastructures to support urban planning. *Ecosystem Services*, 26, 225–235. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.016>
- Zawadzka, J. E., Harris, J. A., & Corstanje, R. (2021). Assessment of heat mitigation capacity of urban greenspaces with the use of InVEST urban cooling model, verified with day-time land surface temperature data. *Landscape and Urban Planning*, 214(May), 104163.

<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104163>