

ESTUDIO DE ISLAS DE CALOR

TEPATITLÁN DE MORELOS. JULIO 2024



Derechos de autor

Se permite la reproducción total o parcial, por razones educacionales o sin ánimo de lucro, de esta publicación sin la autorización especial del portador de los derechos de autor, siempre y cuando la fuente sea citada. El IMPLAN agradece recibir una copia de cualquier publicación que utilice esta publicación del instituto como fuente. No se permite en absoluto hacer uso de esta publicación con fines comerciales o de lucro.

Descargo de responsabilidad

Los hallazgos, interpretaciones y conclusiones expresados en este documento están basados en la información compilada por el equipo del IMPLAN y colaboradores.

No obstante, el IMPLAN no garantiza la precisión o integridad de la información en este documento y no puede ser responsable por errores, omisiones o pérdidas que surjan de su uso.

Créditos

Miguel Ángel Esquivias Esquivias

Presidente Municipal

Elaboración técnica:

Pedro Paúl Flores Navarro

Silvia del Carmen Barajas Barajas

Socorro Leticia Barba García

Jorge Alfonso López Gutiérrez

Héctor Miguel Ulloa Sermeño

Edición:

Julio del 2024

Instituto Municipal de Planeación IMPLAN

Gobierno Municipal de Tepatitlán de Morelos

Micrositio del IMPLAN:

<https://www.tepatitlan.gob.mx/IMPLAN/>

@IMPLANTepaJal

Índice de Contenido:

1. Resumen ejecutivo	7	5.2.3. Análisis climatológico y de cambio climático	27
2. Introducción	7	5.3 Procesamiento de datos	29
2.1 Antecedentes del fenómeno de islas de calor urbanas	9	5.4. Análisis espacial y temporal.....	31
2.2 Justificación del estudio en Tepatitlán de Morelos	10	5.5 Clasificación de rangos de temperatura	33
3. Marco Teórico	12	5.5.1. Definición de rangos:	33
3.1 Definición de islas de calor urbanas	12	5.5.2. Proceso de clasificación:	34
3.2 Factores que contribuyen a su formación	14	5.5.3. Consideraciones específicas:.....	34
3.3 Impactos en la calidad de vida urbana	16	5.5.4. Análisis de distribución:	34
4. Objetivos del Estudio	20	5.5.5. Integración con datos demográficos:	34
4.1. Objetivo General:.....	20	5.5.6. Visualización:	35
4.2. Objetivos Específicos:.....	20	5.5.7. Interpretación y aplicación:	35
4.2.1. Caracterización espacial de las ICU:	20	6. Resultados	37
4.2.2. Análisis temporal de las ICU:	20	6.1 Distribución espacial de temperaturas	37
4.2.3. Factores contribuyentes y mitigantes:	20	6.2 Análisis comparativo 2023-2024	37
4.2.4. Impactos socioambientales:.....	20	6.3 Identificación de zonas críticas	38
4.2.5. Estrategias de mitigación y adaptación:.....	21	6.4 Estimación de población afectada	38
4.2.6. Contribución metodológica:	21	6.5. Análisis espacial y demográfico del estrés térmico urbano	43
4.3. Objetivos de diseminación y aplicación:	21	7. Discusión	46
5. Metodología	23	7.1 Interpretación de resultados	46
5.1 Área de estudio	23	7.2 Factores locales que influyen en el fenómeno	46
5.2 Recolección de datos.....	24	7.3 Implicaciones para la planificación urbana	47
5.2.1 Imágenes satelitales Landsat 8	24	7.4. Representación de los cambios de temperatura.	48
5.2.2 Datos demográficos (INEGI 2020).....	26		

7.5. Representación de los cambios de temperatura, trasladando valores de temperatura a polígonos de manzana en cabecera municipal.	48
7.6. Representación de los rangos de temperatura considerando un límite de confort térmico en la ciudad de Tepatitlán de Morelos	49
7.7. Análisis multitemporal comparativo: Primavera 2023, Primavera 2024.	50
8. Conclusiones	52
9.Recomendaciones	55
9.1 Estrategias de mitigación	55
9.2 Políticas públicas sugeridas	56
9.3 Soluciones basadas en la naturaleza	58
9.4 Futuras líneas de investigación.....	60
8. Referencias bibliográficas.....	62
9. Glosario de términos	64

Ilustraciones

Ilustración 1. Factores que contribuyen a la formación de islas de calor. Elaboración propia	16
Ilustración 2. Impactos en la calidad de la vida urbana. Elaboración propia....	18
Ilustración 3. Elaboración propia con base en Marco Geoestadístico Municipal INEGI, 2019.....	24
Ilustración 4. Climograma (1981 - 2010), estación 14087, La Red. uente: Comisión Nacional del Agua, Estación La Red, Jalisco (20.72, -102.8133). Clave 14087	28
Ilustración 5. Temperatura promedio. Atlas de Riesgos para Tepatitlán de Morelos 2021	29
Ilustración 6. Circuitio Interior Juan Pablo II. Fotografía de Paúl Flores.....	36
Ilustración 7. Centros Educativos / Islas de Calor. Elaboración propia	39

Ilustración 8. Proporción de vegetación. Elaboración propia con SIG	40
Ilustración 9. Temperatura de brillo. Elaboración propia con SIG.....	40
Ilustración 10. Radiancia Espectral. Elaboración propia con SIG	40
Ilustración 11. Índice de vegetación. NDVI. Elaboración propia con SIG.	40
Ilustración 12. Emisividad de la superficie terrestre. Elaboración propia con SIG	41
Ilustración 13. Temperatura de la superficie. Elaboración propia con SIG.....	41
Ilustración 14. Cálculo de Islas de Calor. Elaboración propia con SIG.	41
Ilustración 15. Densidad población por manzana. Hab/ha. Elaboración propia	44
Ilustración 16. Temperatura promedio por manzana. Elaboración propia	44
Ilustración 17. Temperatura promedio por manzana. Elaboración propia	44
Ilustración 18. Temperatura promedio por manzana. Elaboración propia	44
Ilustración 19. Representación de los cambios de temperatura, elaboración propia.....	48
Ilustración 20. Cambios de temperatura / polígonos de manzana. Elaboración propia.....	49
Ilustración 21. Correlación entre rangos de temperatura y confort térmico en Tepatitlán. Elaboración propia.	50
Ilustración 22. Análisis multitemporal comparativo: Primavera 2023, Primavera 2024. Elaboración propia	50

Tablas

Tabla 1. Pirámide de población año 2020, Tepatitlán de Morelos, Jalisco. Elaboración propia con datos de INEGI 2020	26
Tabla 2. Climograma 1981 – 2010 (clave 14087), Tepatitlán de Morelos.	28
Tabla 3. Promedios anuales de temperatura máxima promedio, Tepatitlán. Elaboración propia en base a Información Estadística Climatológica CONAGUA, 1962-2020	28
Tabla 4. Promedios anuales de temperatura mínima promedio, Tepatitlán. Elaboración propia en base a Información Estadística Climatológica CONAGUA, 1962-2020	29
Tabla 5. Principales bosques urbanos. Adaptado de FAO 2016	56
Tabla 6. Beneficios potenciales de los bosques urbanos. Adaptado de FAO 2016	57
Tabla 7. Acciones clave. ONU Hábitat ODS 2016	58

INTRODUCCIÓN

1. Resumen ejecutivo

El presente estudio examina el fenómeno de las islas de calor urbanas (ICU) en Tepatlán de Morelos, Jalisco, México, durante el período 2023-2024. Las ICU, caracterizadas por temperaturas elevadas en áreas urbanas en comparación con sus alrededores rurales (Oke et al., 2017), representan un desafío creciente para la planificación urbana y la salud pública en el contexto del cambio climático global.

Utilizando imágenes satelitales Landsat 8 y aplicando métodos de teledetección (Sobrino et al., 2004), se analizó la distribución espacial y temporal de las temperaturas superficiales en la ciudad. Los datos se clasificaron en cuatro rangos de confort térmico: límite de confort (<32°C), límite soportable (32-36°C), estrés (36-38°C) y peligrosidad (>38°C), basados en los criterios establecidos por Curiel Ballesteros (2015) para entornos urbanos similares.

Los resultados revelan un incremento significativo de las zonas clasificadas como "peligrosidad" y "estrés" entre la primavera de 2023 y 2024, particularmente en la periferia y el centro de la ciudad. El área bajo condiciones de "límite de confort" disminuyó notablemente, indicando una intensificación del efecto de isla de calor. La población potencialmente afectada por condiciones térmicas adversas (estrés y peligrosidad) casi se duplicó, pasando de 6,314 habitantes en 2023 a 12,286 en 2024, según estimaciones basadas en datos censales del INEGI (2020).

Este patrón de cambio sugiere una interacción compleja entre el crecimiento urbano, los cambios en el uso del suelo y las variaciones climáticas regionales (Grimmond, 2007). La expansión de superficies impermeables, la reducción de la

cobertura vegetal y el aumento de las actividades antropogénicas probablemente contribuyen a este fenómeno (Santamouris, 2015).

Las implicaciones de estos hallazgos son significativas para la planificación urbana y la salud pública. El aumento de las temperaturas urbanas no solo afecta el confort térmico de los residentes, sino que también puede exacerbar problemas de salud, incrementar el consumo de energía y afectar la calidad del aire (Heaviside et al., 2017).

Este estudio proporciona una base científica para el desarrollo de estrategias de mitigación y adaptación. Se recomiendan intervenciones como el aumento de la cobertura vegetal urbana, la implementación de soluciones basadas en la naturaleza (sbn), y la revisión de las políticas de desarrollo urbano para incorporar consideraciones térmicas (Norton et al., 2015).

Futuras investigaciones deberían enfocarse en modelar escenarios futuros, considerando proyecciones de cambio climático y desarrollo urbano, para informar una planificación urbana resiliente y sostenible en Tepatlán de Morelos.

2. Introducción

El fenómeno de las islas de calor urbanas (ICU) representa uno de los desafíos más significativos para las ciudades contemporáneas en el contexto del cambio climático global y la rápida urbanización. Este fenómeno, caracterizado por temperaturas elevadas en áreas urbanas en comparación con sus entornos rurales circundantes, ha sido objeto de creciente atención en las últimas décadas debido a sus implicaciones para

la calidad de vida urbana, la salud pública y la sostenibilidad ambiental (Oke et al., 2017).

Las ICU son el resultado de una compleja interacción entre factores antropogénicos¹ y naturales. La sustitución de superficies naturales por materiales urbanos con alta capacidad de absorción y retención de calor, la reducción de la vegetación, la geometría urbana que altera los patrones de viento, y el calor residual generado por actividades humanas contribuyen significativamente a este fenómeno (Santamouris, 2015). Además, la expansión urbana y el aumento de la densidad poblacional intensifican estos efectos, creando un ciclo de retroalimentación positiva que exacerba el calentamiento urbano (Grimmond, 2007).

En el contexto mexicano, el estudio de las ICU ha ganado relevancia en las últimas dos décadas, con investigaciones pioneras en ciudades como la Ciudad de México (Jáuregui, 1997) y Guadalajara (García-Cueto et al., 2007). Sin embargo, la mayoría de los estudios se han centrado en grandes áreas metropolitanas, dejando un vacío significativo en el conocimiento sobre la dinámica térmica de ciudades medias y pequeñas, que constituyen una parte importante del sistema urbano nacional.

Tepatitlán de Morelos, ubicado en el estado de Jalisco, representa un caso de estudio particularmente interesante. Como ciudad media en rápido crecimiento, Tepatitlán enfrenta desafíos en términos de planificación urbana y gestión ambiental. Su expansión urbana reciente, combinada con cambios en los

patrones de uso del suelo y una creciente actividad económica, sugiere la posibilidad de un efecto de isla de calor en desarrollo que merece atención y análisis detallado.

La justificación para este estudio se fundamenta en varios aspectos críticos:

1. Escasez de datos: Existe una notable falta de información sobre la dinámica térmica urbana en ciudades medias mexicanas, lo que dificulta la implementación de políticas de mitigación y adaptación efectivas.
2. Relevancia para la planificación urbana: Comprender la distribución espacial y temporal de las temperaturas urbanas es crucial para informar decisiones de planificación y diseño urbano que promuevan la resiliencia climática (Norton et al., 2015).
3. Implicaciones para la salud pública: Las altas temperaturas urbanas están asociadas con una serie de problemas de salud, incluyendo estrés térmico, enfermedades cardiovasculares y respiratorias, especialmente en poblaciones vulnerables (Heaviside et al., 2017).
4. Consumo energético: El aumento de las temperaturas urbanas conduce a un mayor uso de sistemas de aire acondicionado, incrementando el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que a su vez exacerba el calentamiento global (Santamouris et al., 2015).
5. Equidad ambiental: Las ICU a menudo afectan de manera desproporcionada a las comunidades de bajos ingresos,

¹ Transformaciones, consecuencias y efectos originados por las actividades de los seres humanos que afectan al planeta, es decir, todo lo que hacemos

cotidianamente representa potencialmente una acción positiva o negativa en nuestro entorno.

planteando cuestiones de justicia ambiental que requieren atención (Mitchell & Chakraborty, 2015).

En este contexto, el presente estudio se propone analizar la distribución espacial y temporal de las temperaturas superficiales en Tepatitlán de Morelos durante el período 2023-2024, utilizando imágenes satelitales y técnicas de teledetección. El objetivo es proporcionar una base científica sólida para comprender la magnitud y características del fenómeno de isla de calor urbana en la ciudad, así como sus posibles implicaciones para la planificación urbana, la salud pública y la calidad de vida de los residentes.

Esta investigación no solo contribuirá al cuerpo de conocimiento sobre ICU en ciudades medias mexicanas, sino que también proporcionará información valiosa para los tomadores de decisiones locales, planificadores urbanos y profesionales de la salud pública. Los resultados del estudio servirán como base para el desarrollo de estrategias de mitigación y adaptación específicas para Tepatitlán, con potencial aplicabilidad a otras ciudades de tamaño y características similares en la región.

2.1 Antecedentes del fenómeno de islas de calor urbanas

El fenómeno de las islas de calor urbanas (ICU) ha sido objeto de estudio científico desde hace más de un siglo, con las primeras observaciones sistemáticas atribuidas a Luke Howard en Londres a principios del siglo XIX (Mills, 2008). Sin embargo, fue a partir de la segunda mitad del siglo XX cuando la investigación en este campo se intensificó, coincidiendo con la rápida urbanización global y el creciente interés en los impactos ambientales del desarrollo urbano.

El término "isla de calor urbana" fue acuñado por Manley en 1958, describiendo el fenómeno como una anomalía térmica característica de las áreas urbanas en comparación con sus alrededores rurales (Manley, 1958). Desde entonces, numerosos estudios han contribuido a una comprensión más profunda de las causas, características y consecuencias de las ICU.

Oke (1982) proporcionó una base teórica fundamental para el estudio de las ICU, identificando los principales procesos físicos que contribuyen a su formación. Estos incluyen la modificación del balance energético superficial debido a cambios en la geometría urbana, las propiedades térmicas de los materiales urbanos, la reducción de la evapotranspiración y el calor antropogénico. Este trabajo sentó las bases para investigaciones posteriores que han profundizado en cada uno de estos aspectos.

En las últimas décadas, el avance en las tecnologías de teledetección y modelado climático ha permitido un análisis más detallado y a mayor escala de las ICU. Estudios como el de Voogt y Oke (2003) han demostrado la utilidad de las imágenes satelitales para mapear y cuantificar las temperaturas superficiales urbanas, proporcionando una visión espacial y temporal más completa del fenómeno.

En el contexto latinoamericano, la investigación sobre ICU ha ganado impulso en las últimas dos décadas. Trabajos pioneros como el de Jáuregui (1997) en la Ciudad de México revelaron la magnitud y características de la isla de calor en una de las mayores metrópolis de la región. En Brasil, estudios como el de Lombardo (1985) en São Paulo sentaron precedentes para la investigación de ICU en grandes áreas urbanas tropicales.

En México, además del trabajo de Jáuregui, se han realizado estudios significativos en varias ciudades. García-Cueto et al.

(2007) analizaron la ICU en Mexicali, relacionándola con los patrones de uso del suelo. En Guadalajara, la ciudad más cercana a Tepatitlán, Tereshchenko y Filonov (2001) examinaron la estructura térmica de la ciudad utilizando datos de estaciones meteorológicas y técnicas de teledetección.

A pesar de estos avances, la mayoría de los estudios en México se han centrado en grandes áreas metropolitanas, dejando un vacío significativo en el conocimiento sobre la dinámica térmica de ciudades medias y pequeñas. Este vacío es particularmente notable considerando que estas ciudades están experimentando tasas de crecimiento rápido y enfrentan desafíos únicos en términos de planificación urbana y adaptación al cambio climático.

En años recientes, el interés por las ICU ha trascendido el ámbito puramente académico para convertirse en una preocupación de planificadores urbanos y responsables políticos. Esto se debe al reconocimiento de sus impactos significativos en la salud pública, el consumo energético y la calidad de vida urbana (Heaviside et al., 2017). Además, en el contexto del cambio climático global, las ICU se perciben como un factor agravante que puede amplificar los efectos del calentamiento global en entornos urbanos (Li & Bou-Zeid, 2013).

La evolución de la investigación sobre ICU también ha llevado a un enfoque más integral, que considera no solo los aspectos físicos del fenómeno, sino también sus dimensiones sociales y económicas. Estudios recientes han explorado la relación entre las ICU y la justicia ambiental, revelando que los impactos del calor urbano a menudo se distribuyen de manera desigual,

afectando desproporcionadamente a comunidades vulnerables (Mitchell & Chakraborty, 2015).

En este contexto, el estudio de las ICU en Tepatitlán de Morelos se presenta como una oportunidad para llenar un vacío importante en la literatura, proporcionando *insights*² valiosos sobre la dinámica térmica de una ciudad media en rápido crecimiento. Además, este estudio tiene el potencial de informar políticas de planificación urbana y adaptación al cambio climático que sean relevantes no solo para Tepatitlán, sino para otras ciudades de tamaño y características similares en México y América Latina.

2.2 Justificación del estudio en Tepatitlán de Morelos

El estudio de las islas de calor urbanas (ICU) en Tepatitlán de Morelos se justifica por una serie de factores críticos que subrayan su importancia tanto para la comunidad local como para el ámbito académico y de políticas públicas en un contexto más amplio.

En primer lugar, Tepatitlán de Morelos representa un caso de estudio significativo como ciudad media en rápido crecimiento. Con una población que alcanzó los 150,190 habitantes en 2020 (INEGI, 2020) y una tasa de crecimiento anual del 1.5% entre 2010 y 2020, la ciudad está experimentando una transformación urbana acelerada. Este crecimiento implica cambios en el uso del suelo, expansión de la mancha urbana y modificaciones en la morfología de la ciudad, factores que están directamente

² Información de valor que aporta conocimiento e inteligencia

relacionados con la formación y intensificación de las ICU (Oke et al., 2017).

La ubicación geográfica de Tepatitlán, en la región de Los Altos de Jalisco, con un clima semicálido subhúmedo (García, 2004), presenta condiciones propicias para el desarrollo de ICU. El estudio de este fenómeno en un contexto climático específico puede aportar conocimientos valiosos sobre la interacción entre las características locales del clima y los procesos de urbanización en la formación de microclimas urbanos.

Además, la economía de Tepatitlán, basada en una combinación de actividades agrícolas, ganaderas e industriales (H. Ayuntamiento de Tepatitlán, 2018), ofrece un escenario único para estudiar cómo diferentes patrones de uso del suelo y actividades económicas influyen en la distribución espacial de las temperaturas urbanas. Este aspecto es particularmente relevante considerando que la mayoría de los estudios sobre ICU se han centrado en grandes áreas metropolitanas con economías predominantemente de servicios.

Desde una perspectiva de planificación urbana, este estudio es crucial para informar políticas de desarrollo sostenible y resiliente al clima. Tepatitlán, como muchas ciudades medias en México, enfrenta desafíos en términos de planificación del crecimiento urbano, gestión de recursos hídricos y adaptación al cambio climático (IMPLAN Tepatitlán, 2019). La comprensión detallada de la dinámica térmica de la ciudad puede proporcionar una base científica sólida para el diseño de estrategias de mitigación y adaptación específicas para el contexto local.

En el ámbito de la salud pública, el estudio de las ICU en Tepatitlán adquiere especial relevancia. Las altas temperaturas

asociadas con las ICU están vinculadas a una serie de problemas de salud, incluyendo estrés térmico, enfermedades cardiovasculares y respiratorias (Heaviside et al., 2017). En un contexto de cambio climático global, donde se prevé un aumento en la frecuencia e intensidad de las olas de calor, comprender la distribución espacial y temporal de las temperaturas urbanas es fundamental para desarrollar estrategias de prevención y respuesta en salud pública.

Desde una perspectiva de equidad ambiental, este estudio puede arrojar luz sobre posibles disparidades en la exposición al calor urbano entre diferentes sectores de la población. Investigaciones previas han demostrado que las ICU a menudo afectan de manera desproporcionada a comunidades de bajos ingresos y grupos vulnerables (Mitchell & Chakraborty, 2015). Identificar tales patrones en Tepatitlán podría informar políticas urbanas más equitativas y programas de intervención dirigidos.

En el ámbito académico, este estudio contribuye a llenar un vacío significativo en la literatura sobre ICU en ciudades medias mexicanas. La mayoría de las investigaciones en México se han centrado en grandes áreas metropolitanas como la Ciudad de México (Jáuregui, 1997) o Guadalajara (Tereshchenko & Filonov, 2001), dejando un conocimiento limitado sobre la dinámica térmica de ciudades de tamaño medio. Los resultados de este estudio podrían proporcionar un punto de comparación valioso y potencialmente generalizable a otras ciudades de características similares en la región.

Además, el enfoque metodológico del estudio, que utiliza imágenes satelitales y técnicas de teledetección, contribuye al desarrollo y refinamiento de métodos para el análisis de ICU en contextos donde los datos de estaciones meteorológicas

terrestres pueden ser limitados. Esto es particularmente relevante para muchas ciudades medias y pequeñas en países en desarrollo, donde la infraestructura de monitoreo climático puede ser escasa.

Finalmente, este estudio se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas, particularmente el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y el ODS 13 (Acción por el clima) (ONU, 2015). Al proporcionar información crucial sobre los patrones térmicos urbanos, el estudio puede contribuir a la formulación de políticas y estrategias que promuevan ciudades más habitables, sostenibles y resilientes al clima.

El estudio de las ICU en Tepatitlán de Morelos se justifica por su potencial para informar la planificación urbana sostenible, mejorar la salud pública, promover la equidad ambiental, y contribuir al conocimiento científico sobre la dinámica térmica de ciudades medias en rápido crecimiento. Los resultados de este estudio no solo beneficiarán a Tepatitlán, sino que también podrían tener implicaciones más amplias para otras ciudades similares en México y América Latina.

3. Marco Teórico

3.1 Definición de islas de calor urbanas

Las islas de calor urbanas (ICU) constituyen un fenómeno climático característico de los entornos urbanos, que se ha convertido en un tema central en la climatología urbana y la planificación de ciudades sostenibles. Este fenómeno se define fundamentalmente como la diferencia de temperatura observada entre las áreas urbanas y sus alrededores rurales circundantes

(Oke, 1982). Sin embargo, esta definición básica ha evolucionado y se ha refinado a lo largo de las décadas de investigación en este campo.

Desde una perspectiva más completa, las ICU pueden entenderse como una anomalía térmica tridimensional asociada con el entorno construido y las actividades humanas en áreas urbanas (Voogt & Oke, 2003). Esta conceptualización más amplia reconoce que el fenómeno no se limita a la superficie, sino que se extiende verticalmente en la atmósfera urbana, creando lo que se conoce como la capa límite urbana.

Es importante distinguir entre diferentes tipos de ICU, ya que cada uno refleja aspectos distintos del fenómeno y se mide de manera diferente:

1. Isla de Calor Superficial (ICS): Se refiere a las diferencias de temperatura en las superficies urbanas en comparación con las rurales. Este tipo de ICU es el que se observa comúnmente en estudios basados en teledetección, como el presente análisis de Tepatitlán de Morelos. Las ICS pueden ser particularmente intensas durante el día, especialmente en superficies expuestas a la radiación solar directa (Arnfield, 2003).
2. Isla de Calor Atmosférica (ICA): Esta se refiere a las diferencias de temperatura del aire entre áreas urbanas y rurales. Se puede subdividir en: a) ICU de la capa de dosel: medida cerca de la superficie, generalmente entre 1.5 y 3 metros sobre el suelo. b) ICU de la capa límite: que se extiende desde el nivel de los techos hasta la atmósfera superior donde la influencia urbana en la temperatura es negligible.

La intensidad de una ICU se cuantifica típicamente como la diferencia máxima de temperatura entre el área urbana y su entorno rural (ΔT_{u-r}). Esta intensidad puede variar significativamente dependiendo de factores como el tamaño de la ciudad, la densidad de construcción, las condiciones meteorológicas, la hora del día y la estación del año (Oke et al., 2017).

En el contexto de ciudades medias como Tepatitlán de Morelos, la definición y cuantificación de las ICU presenta desafíos particulares. A diferencia de las grandes metrópolis donde el contraste urbano-rural es más pronunciado, en ciudades medias la transición entre áreas urbanas y rurales puede ser más gradual. Esto requiere una consideración cuidadosa de cómo se definen los límites urbanos y rurales para el cálculo de la intensidad de la ICU (Stewart & Oke, 2012).

Además, es crucial reconocer que las ICU no son homogéneas dentro de una ciudad. Pueden existir variaciones significativas en la intensidad y distribución espacial de las temperaturas urbanas, creando lo que algunos investigadores han denominado "archipiélagos de calor urbano" (Memon et al., 2009). Estas variaciones intraurbanas están influenciadas por factores como la geometría urbana, el uso del suelo, la presencia de vegetación y cuerpos de agua, y las actividades antropogénicas locales.

En el caso específico de Tepatitlán, la definición de ICU debe considerar las características particulares de la ciudad, como su topografía, su patrón de crecimiento urbano y su mezcla de usos del suelo urbanos y periurbanos. La presencia de actividades agrícolas y ganaderas en las inmediaciones de la ciudad podría influir en la dinámica térmica local, creando patrones de ICU que

podrían diferir de los observados en ciudades más grandes y densamente urbanizadas.

Es importante también considerar la dimensión temporal de las ICU. Aunque tradicionalmente se han estudiado como un fenómeno nocturno, cuando la diferencia de temperatura entre áreas urbanas y rurales suele ser más pronunciada, las ICU pueden manifestarse con características diferentes durante el día, especialmente a nivel de superficie (Roth et al., 1989).

En el contexto del cambio climático global, la definición de ICU también debe considerar la interacción entre el calentamiento urbano local y las tendencias climáticas regionales y globales. Algunos estudios sugieren que las ICU pueden amplificar los efectos del cambio climático en entornos urbanos, creando lo que se ha denominado "efecto de calentamiento combinado" (Li & Bou-Zeid, 2013).

En resumen, para el presente estudio en Tepatitlán de Morelos, se adopta una definición comprehensiva de las ICU que abarca:

1. La diferencia de temperatura superficial entre el área urbana y su entorno rural circundante.
2. La variabilidad espacial y temporal de las temperaturas dentro del área urbana.
3. La consideración de factores locales específicos que pueden influir en la formación y características de las ICU en una ciudad media en rápido crecimiento.

Esta definición multifacética permite una comprensión más completa y matizada del fenómeno de ICU en Tepatitlán, proporcionando una base sólida para el análisis de sus causas, impactos y posibles estrategias de mitigación.

3.2 Factores que contribuyen a su formación

La formación de las islas de calor urbanas (ICU) es el resultado de una compleja interacción de diversos factores físicos, antropogénicos y meteorológicos. En el contexto de Tepatitlán de Morelos, una ciudad media en rápido crecimiento, es crucial examinar estos factores considerando las características específicas del entorno local. A continuación, se analizan los principales elementos que contribuyen a la formación de ICU:

1. Modificación de la superficie terrestre:

La urbanización implica cambios significativos en la cobertura del suelo. En Tepatitlán, como en otras ciudades en crecimiento, se observa una transición de superficies naturales a materiales urbanos como asfalto, concreto y otros materiales de construcción. Estos materiales se caracterizan por:

- a) Menor albedo³: Los materiales urbanos tienden a tener un albedo más bajo que las superficies naturales, lo que significa que absorben más radiación solar (Taha, 1997).
- b) Mayor capacidad térmica: Los materiales de construcción almacenan más calor durante el día y lo liberan lentamente por la noche, contribuyendo al efecto de ICU nocturno (Oke et al., 2017).
- c) Impermeabilidad: La reducción de superficies permeables disminuye la evapotranspiración, limitando el enfriamiento natural (Grimmond & Oke, 1991).

³ Porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre ella. Las superficies claras tienen valores de albedo superiores

2. Geometría urbana:

La disposición y forma de los edificios y calles en Tepatitlán influyen significativamente en la formación de ICU:

- a) Efecto cañón: Las calles estrechas flanqueadas por edificaciones pueden crear "cañones urbanos" que atrapan el calor y reducen la ventilación (Oke, 1988).
- b) Factor de visión del cielo: Un factor de visión del cielo reducido en áreas urbanas densas limita la pérdida de calor radiativo nocturno (Unger, 2004).
- c) Rugosidad superficial: El aumento de la rugosidad urbana modifica los patrones de viento, afectando la dispersión del calor (Grimmond & Oke, 1999).

3. Calor antropogénico:

Las actividades humanas en Tepatitlán generan calor adicional que contribuye a la ICU:

- a) Tráfico vehicular: El aumento del parque automotor en la ciudad es una fuente significativa de calor (González et al., 2005).
- b) Sistemas de climatización: El uso creciente de aires acondicionados, especialmente en verano, genera calor residual (Salamanca et al., 2014).
- c) Actividades industriales: Las zonas industriales de Tepatitlán pueden ser focos importantes de emisión de calor (Sailor, 2011).

4. Reducción de áreas verdes:

a las oscuras, y las brillantes más que las mates. El albedo medio de la Tierra es aproximadamente 0.3.

La expansión urbana en Tepatitlán ha llevado a una disminución de la cobertura vegetal:

a) Menor evapotranspiración: La reducción de vegetación limita el enfriamiento natural por evapotranspiración (Bowler et al., 2010).

b) Pérdida de sombra natural: Menos árboles significan menos sombra, aumentando la exposición a la radiación solar directa (Shashua-Bar & Hoffman, 2000).

5. Condiciones meteorológicas:

Factores climáticos específicos de Tepatitlán influyen en la intensidad de la ICU:

a) Velocidad del viento: Vientos débiles favorecen la formación de ICU más intensas (Morris et al., 2001).

b) Nubosidad: Cielos despejados, comunes en la región, intensifican el efecto de ICU, especialmente por la noche (Oke et al., 2017).

c) Estacionalidad: Las variaciones estacionales en temperatura y precipitación afectan la dinámica de la ICU (Jáuregui, 1997).

6. Topografía local:

La ubicación de Tepatitlán en la región de Los Altos de Jalisco implica consideraciones topográficas:

a) Efectos de elevación: Las variaciones en elevación dentro de la ciudad pueden crear microclimas locales (Goldreich, 2009).

b) Patrones de drenaje de aire: La topografía puede influir en los patrones de circulación de aire, afectando la distribución del calor urbano (Ketterer & Matzarakis, 2014).

7. Patrón de crecimiento urbano:

El desarrollo específico de Tepatitlán contribuye a la formación de ICU:

a) Expansión periférica: El crecimiento hacia las afueras puede crear nuevos focos de calor urbano (Merlotto et al., 2021).

b) Densificación: El aumento de la densidad en ciertas áreas puede intensificar localmente el efecto de ICU (Debbage & Shepherd, 2015).

8. Actividades económicas locales:

Las características económicas de Tepatitlán influyen en la formación de ICU:

a) Industria agropecuaria: Las actividades ganaderas y agrícolas en la periferia pueden crear patrones térmicos únicos (Kalnay & Cai, 2003).

b) Zonas comerciales: Las áreas de alta actividad comercial pueden ser focos de calor antropogénico (Sailor & Lu, 2004).

Es importante destacar que estos factores no actúan de manera aislada, sino que interactúan de forma compleja. Por ejemplo, la geometría urbana puede amplificar el efecto del calor antropogénico, mientras que la presencia de áreas verdes puede mitigar los impactos de los materiales urbanos con alto almacenamiento térmico.

En el caso específico de Tepatitlán, la comprensión de cómo estos factores se manifiestan y se interrelacionan en el contexto local es crucial para desarrollar estrategias efectivas de mitigación de ICU. Este análisis detallado de los factores contribuyentes proporciona una base sólida para la

interpretación de los resultados del estudio y para la formulación de recomendaciones de planificación urbana adaptadas a las características únicas de la ciudad.

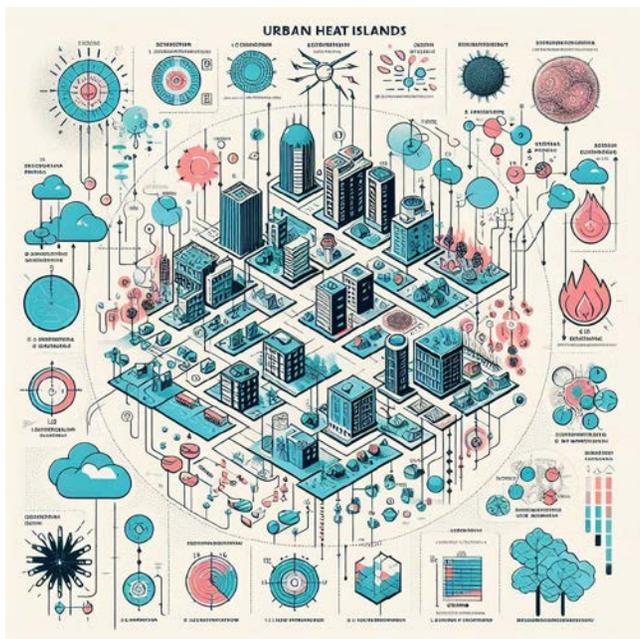


Ilustración 1. Factores que contribuyen a la formación de islas de calor. Elaboración propia

3.3 Impactos en la calidad de vida urbana

Las islas de calor urbanas (ICU) tienen un impacto significativo y multifacético en la calidad de vida de los habitantes de las ciudades. En el contexto de Tepatitlán de Morelos, una ciudad media en rápido crecimiento, estos impactos adquieren características particulares que merecen un análisis detallado. A continuación, se examinan los principales efectos de las ICU en la calidad de vida urbana:

1. Salud pública:

Las ICU tienen implicaciones directas e indirectas para la salud de la población urbana:

a) Estrés térmico: Las temperaturas elevadas aumentan el riesgo de enfermedades relacionadas con el calor, como golpes de calor, deshidratación y agotamiento (Heaviside et al., 2017). En Tepatitlán, donde las temperaturas máximas en verano pueden superar los 30°C, este riesgo es particularmente relevante.

b) Exacerbación de enfermedades crónicas: Las altas temperaturas pueden agravar condiciones preexistentes como enfermedades cardiovasculares y respiratorias (Basu & Samet, 2002). Esto es especialmente preocupante para poblaciones vulnerables como adultos mayores y personas con condiciones crónicas.

c) Calidad del aire: Las ICU pueden contribuir a la formación de smog fotoquímico y aumentar la concentración de contaminantes atmosféricos (Sarrat et al., 2006). En una ciudad en crecimiento como Tepatitlán, donde el tráfico vehicular y las actividades industriales están en aumento, este impacto merece especial atención.

d) Alteraciones del sueño: Las noches más cálidas pueden afectar la calidad del sueño, lo que a su vez impacta en la salud mental y el rendimiento diurno (Obradovich et al., 2017).

2. Confort térmico y habitabilidad:

El aumento de las temperaturas urbanas afecta directamente la comodidad y la habitabilidad de los espacios públicos y privados:

a) Reducción del uso de espacios públicos: Las altas temperaturas pueden disuadir a las personas de utilizar parques, plazas y otros espacios abiertos, afectando la vida comunitaria y la actividad física (Kántor & Unger, 2010).

b) Aumento de la demanda de climatización: La necesidad de mantener temperaturas confortables en interiores lleva a un mayor uso de sistemas de aire acondicionado, lo que a su vez contribuye al efecto de ICU y aumenta el consumo energético (Salamanca et al., 2014).

c) Diseño urbano y arquitectónico: Las ICU plantean desafíos para el diseño de edificios y espacios públicos que sean confortables y energéticamente eficientes en un clima más cálido (Santamouris, 2014).

3. Consumo energético y sostenibilidad:

Las ICU tienen implicaciones significativas para el consumo de energía y la sostenibilidad urbana:

a) Aumento de la demanda eléctrica: El mayor uso de sistemas de climatización incrementa la demanda de electricidad, especialmente durante los picos de calor (Akbari, 2005). En Tepatitlán, esto podría ejercer presión sobre la infraestructura eléctrica local.

b) Emisiones de gases de efecto invernadero: El aumento del consumo energético asociado a las ICU contribuye a mayores emisiones de CO₂, creando un ciclo de retroalimentación positiva con el cambio climático global (Oke et al., 2017).

c) Eficiencia energética: Las ICU plantean desafíos para la eficiencia energética de los edificios, requiriendo estrategias de

diseño y construcción adaptadas a temperaturas más altas (Santamouris et al., 2015).

4. Economía local:

Los efectos de las ICU pueden tener repercusiones económicas significativas:

a) Costos de energía: El aumento en el consumo eléctrico para climatización se traduce en mayores gastos para hogares y empresas (Akbari et al., 2001).

b) Productividad laboral: Las altas temperaturas pueden afectar negativamente la productividad, especialmente en trabajos al aire libre o en edificios sin climatización adecuada (Zander et al., 2015).

c) Turismo y comercio: El discomfort térmico en espacios públicos puede afectar la actividad comercial y turística, sectores importantes para la economía de Tepatitlán (Hartz et al., 2006).

5. Equidad social y ambiental:

Las ICU pueden exacerbar las desigualdades existentes en la ciudad:

a) Distribución desigual de impactos: Los efectos de las ICU suelen ser más pronunciados en áreas de bajos ingresos, que a menudo tienen menos vegetación y acceso limitado a sistemas de climatización (Mitchell & Chakraborty, 2015).

b) Vulnerabilidad diferencial: Ciertos grupos, como adultos mayores, niños y personas con enfermedades crónicas, son más susceptibles a los efectos adversos de las altas temperaturas (Harlan et al., 2006).

c) Acceso a espacios verdes: La distribución desigual de parques y áreas verdes puede resultar en una exposición diferencial a los efectos de las ICU (Wolch et al., 2014).

6. Biodiversidad urbana:

Las ICU pueden afectar la flora y fauna local:

a) Alteración de hábitats: El aumento de temperaturas puede modificar las condiciones de vida de especies vegetales y animales en el entorno urbano (Parris & Hazell, 2005).

b) Cambios fenológicos: Las ICU pueden alterar los ciclos biológicos de plantas y animales, afectando la sincronización de procesos ecológicos importantes (Neil & Wu, 2006).

7. Resiliencia urbana:

Las ICU representan un desafío para la capacidad de la ciudad de adaptarse al cambio climático:

a) Amplificación de eventos extremos: Las ICU pueden intensificar el impacto de olas de calor y otros eventos climáticos extremos (Li & Bou-Zeid, 2013).

b) Planificación a largo plazo: La necesidad de abordar las ICU requiere una planificación urbana que integre consideraciones climáticas en el desarrollo futuro de la ciudad (Revi et al., 2014).

En el contexto específico de Tepatitlán de Morelos, estos impactos deben considerarse en relación con las características únicas de la ciudad, como su rápido crecimiento, su mezcla de usos del suelo urbanos y periurbanos, y su importancia económica regional. La comprensión detallada de cómo las ICU afectan la calidad de vida en Tepatitlán es fundamental para

desarrollar estrategias de mitigación y adaptación efectivas que mejoren la habitabilidad, sostenibilidad y resiliencia de la ciudad.

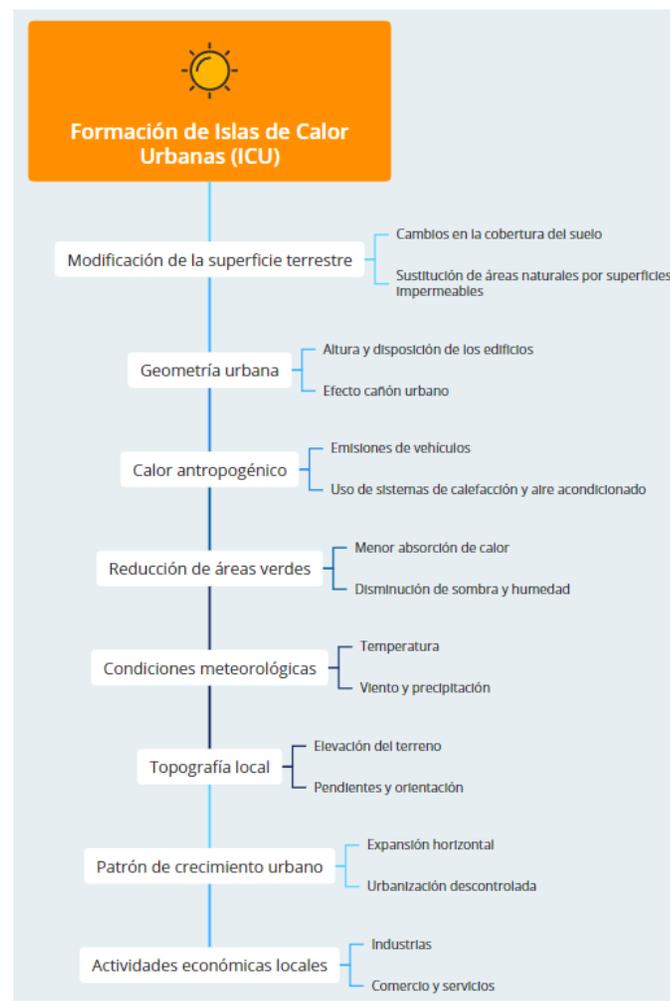


Ilustración 2. Impactos en la calidad de la vida urbana. Elaboración propia

OBJETIVOS

4. Objetivos del Estudio

El presente estudio sobre las islas de calor urbanas (ICU) en Tepatitlán de Morelos se propone alcanzar los siguientes objetivos, fundamentados en la comprensión integral del fenómeno y su relevancia para la planificación urbana sostenible:

4.1. Objetivo General:

Analizar la distribución espacial y temporal de las islas de calor urbanas en Tepatitlán de Morelos durante el período 2023-2024, con el fin de comprender su dinámica, impactos y proponer estrategias de mitigación adaptadas al contexto local.

4.2. Objetivos Específicos:

4.2.1. Caracterización espacial de las ICU:

- a) Identificar y mapear las variaciones de temperatura superficial en el área urbana y periurbana de Tepatitlán utilizando imágenes satelitales de alta resolución (Landsat 8).
- b) Cuantificar la intensidad de la isla de calor urbana (ΔT_{u-r}) en diferentes zonas de la ciudad, considerando las variaciones estacionales y diurnas/nocturnas.
- c) Analizar la relación entre los patrones térmicos observados y las características del uso del suelo, incluyendo áreas residenciales, comerciales, industriales y espacios verdes.

4.2.2. Análisis temporal de las ICU:

- a) Evaluar la evolución de las ICU entre 2023 y 2024, identificando tendencias y cambios significativos en su distribución e intensidad.

- b) Examinar la variabilidad estacional de las ICU, comparando los patrones térmicos en diferentes épocas del año (invierno, primavera, verano y otoño).

- c) Investigar la relación entre los cambios observados en las ICU y los procesos de urbanización y desarrollo en Tepatitlán durante el período de estudio.

4.2.3. Factores contribuyentes y mitigantes:

- a) Identificar los principales factores urbanos y ambientales que contribuyen a la formación e intensificación de las ICU en Tepatitlán, incluyendo la geometría urbana, materiales de construcción y actividades antropogénicas.
- b) Evaluar el papel de las áreas verdes y cuerpos de agua en la mitigación de las ICU, cuantificando su efecto de enfriamiento en diferentes contextos urbanos.
- c) Analizar la influencia de factores topográficos y meteorológicos locales en la distribución y intensidad de las ICU.

4.2.4. Impactos socioambientales:

- a) Estimar la población expuesta a diferentes niveles de intensidad de ICU, utilizando datos demográficos y socioeconómicos del INEGI (2020).
- b) Evaluar la distribución espacial de los impactos de las ICU en relación con indicadores de vulnerabilidad social, identificando posibles inequidades en la exposición al calor urbano.
- c) Analizar los potenciales efectos de las ICU en el consumo energético para climatización, utilizando modelos de demanda energética adaptados al contexto local.

4.2.5. Estrategias de mitigación y adaptación:

- a) Identificar áreas prioritarias para la implementación de medidas de mitigación de ICU, basadas en la intensidad del fenómeno y la vulnerabilidad de la población.
- b) Proponer estrategias específicas de mitigación y adaptación, considerando soluciones basadas en la naturaleza, modificaciones en el diseño urbano y políticas de planificación.
- c) Evaluar el potencial impacto de las estrategias propuestas mediante simulaciones, considerando su viabilidad técnica y económica en el contexto de Tepatlán.

4.2.6. Contribución metodológica:

- a) Desarrollar y validar una metodología para el estudio de ICU en ciudades medias mexicanas, que pueda ser replicada en otros contextos similares.
- b) Integrar técnicas de teledetección, sistemas de información geográfica (SIG) y modelado climático urbano para un análisis integral de las ICU.

4.3. Objetivos de disseminación y aplicación:

- a) Generar un informe técnico detallado para las autoridades locales y planificadores urbanos de Tepatlán, proporcionando recomendaciones basadas en evidencia para la mitigación de ICU.
- b) Producir mapas de riesgo térmico y vulnerabilidad que puedan ser integrados en los instrumentos de planeación urbana y gestión ambiental de la ciudad.

- c) Desarrollar material de divulgación para sensibilizar a la población local sobre el fenómeno de ICU y promover prácticas sostenibles a nivel comunitario.

Estos objetivos se han formulado considerando las características específicas de Tepatlán de Morelos, incluyendo su rápido crecimiento urbano, su contexto climático regional y su importancia como ciudad media en Jalisco. El estudio busca no solo avanzar en la comprensión científica de las ICU, sino también proporcionar información práctica y aplicable para mejorar la calidad de vida urbana y la resiliencia climática de la ciudad.

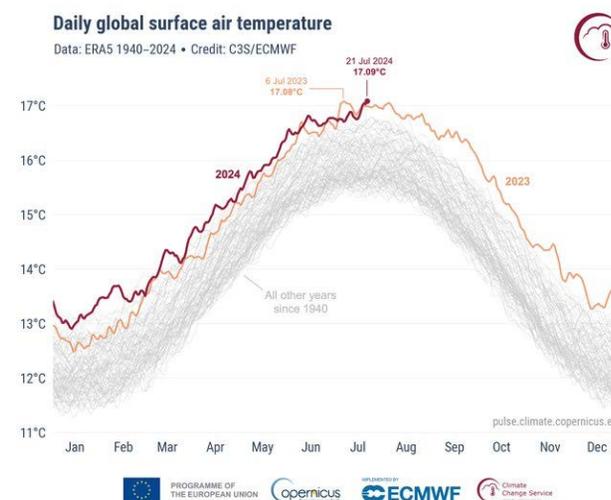


Ilustración 3. Record de temperatura global. 21 julio 2024.
Fuente Copernicus

METODOLOGÍA

5. Metodología

5.1 Área de estudio

El área de estudio comprende el municipio de Tepatitlán de Morelos, ubicado en la región Altos Sur del estado de Jalisco, México. Este municipio representa un caso de estudio significativo para el análisis de islas de calor urbanas (ICU) en ciudades medias mexicanas en rápido crecimiento.

Ubicación geográfica: Tepatitlán de Morelos se encuentra situado entre las coordenadas 20°49' N y 102°46' O, a una altitud promedio de 1,800 metros sobre el nivel del mar. El municipio cubre una superficie total de 1,532.78 km² (INEGI, 2020), lo que lo convierte en uno de los municipios más extensos de Jalisco.

Características topográficas: La topografía del municipio es variada, caracterizada por un relieve accidentado típico de la región de Los Altos de Jalisco. Presenta una combinación de planicies, lomeríos y algunas elevaciones significativas, lo cual puede influir en la formación y distribución de las ICU. Esta variación topográfica es un factor importante a considerar en el análisis, ya que puede crear microclimas locales y afectar los patrones de circulación del aire (Goldreich, 2009).

Clima: Tepatitlán presenta un clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano (García, 2004). La temperatura media anual oscila alrededor de los 19°C, con máximas que pueden superar los 30°C en verano y mínimas cercanas a los 5°C en invierno. Esta amplitud térmica y la estacionalidad marcada son factores cruciales para el estudio de las ICU a lo largo del año.

Estructura urbana: La cabecera municipal, también llamada Tepatitlán de Morelos, es el principal centro urbano del municipio

y el foco principal del estudio de ICU. La ciudad ha experimentado un crecimiento urbano significativo en las últimas décadas, con una población que alcanzó los 150,190 habitantes en 2020 (INEGI, 2020).

El área urbana se caracteriza por una mezcla de usos de suelo que incluye:

1. Zonas residenciales de diversa densidad
2. Áreas comerciales e industriales
3. Espacios públicos y áreas verdes
4. Infraestructura vial y de servicios

Esta diversidad en el uso del suelo es fundamental para el análisis de la distribución espacial de las ICU, ya que diferentes tipos de cobertura y actividades urbanas pueden generar patrones térmicos distintos. Crecimiento y expansión urbana: El municipio, y en particular su cabecera, ha experimentado un crecimiento urbano acelerado en las últimas décadas. Este proceso de urbanización ha llevado a la conversión de áreas naturales y agrícolas en zonas urbanas, un factor clave en la formación y intensificación de ICU (Oke et al., 2017).

Actividades económicas: Tepatitlán se caracteriza por una economía diversificada que incluye:

1. Industria agropecuaria, destacando la producción avícola y lechera
2. Manufactura, incluyendo industrias textiles y de alimentos
3. Comercio y servicios

Estas actividades económicas son relevantes para el estudio de ICU, ya que pueden contribuir al calor antropogénico y modificar los patrones de uso del suelo.

Cobertura vegetal: El municipio presenta una variedad de coberturas vegetales, incluyendo:

1. Áreas verdes urbanas (parques, jardines)
2. Vegetación natural remanente en territorio rural
3. Zonas agrícolas circundantes

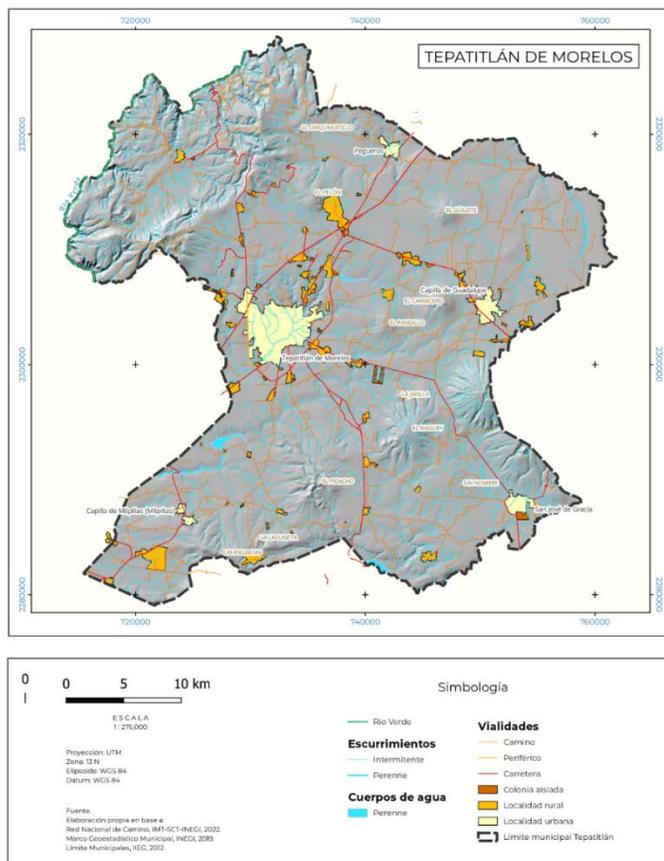


Ilustración 4. Elaboración propia con base en Marco Geoestadístico Municipal INEGI, 2019

La distribución y características de esta cobertura vegetal son cruciales para el análisis de su efecto mitigante en las ICU (Bowler et al., 2010).

5.2 Recolección de datos

5.2.1 Imágenes satelitales Landsat 8

La recolección de datos para el estudio de las islas de calor urbanas (ICU) en Tepatitlán de Morelos se basa principalmente en la adquisición y procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8. Esta plataforma de observación terrestre proporciona datos de alta calidad y resolución adecuada para el análisis térmico urbano a escala municipal. A continuación, se detalla el proceso de recolección de datos mediante Landsat 8:

1. Fuente de datos:

Las imágenes Landsat 8 se obtuvieron del U.S. Geological Survey (USGS) Earth Explorer, un repositorio de acceso libre que proporciona datos de observación terrestre de alta calidad (USGS, 2021).

2. Características de Landsat 8:

Landsat 8 opera con dos sensores principales:

- Operational Land Imager (OLI): proporciona imágenes en 9 bandas espectrales.
- Thermal Infrared Sensor (TIRS): captura datos en 2 bandas térmicas.

La resolución espacial es de 30 metros para las bandas multispectrales y 100 metros para las bandas térmicas, aunque

estas últimas se remuestran a 30 metros para coincidir con las otras bandas (Roy et al., 2014).

3. Selección temporal de imágenes:

Se seleccionaron imágenes correspondientes al período de estudio (2023-2024), con énfasis en capturar la variabilidad estacional:

- Invierno: diciembre, enero, febrero
- Primavera: marzo, abril, mayo
- Verano: junio, julio, agosto
- Otoño: septiembre, octubre, noviembre

Para cada estación, se procuró obtener al menos una imagen clara y libre de nubes, resultando en un mínimo de 4 imágenes por año.

4. Criterios de selección de imágenes:

a) Cobertura nubosa: Se seleccionaron imágenes con menos del 10% de cobertura nubosa sobre el área de estudio para minimizar la interferencia en el análisis térmico.

b) Ángulo de elevación solar: Se priorizaron imágenes con ángulos de elevación solar superiores a 65° para reducir los efectos de sombras en áreas urbanas.

c) Hora de adquisición: Se seleccionaron imágenes diurnas, capturadas alrededor del mediodía local (entre las 16:00 y las 17:00 horas) para maximizar el contraste térmico urbano-rural.

5. Preprocesamiento de imágenes:

a) Recorte del área de estudio: Las imágenes se recortaron al límite municipal de Tepatitlán de Morelos para facilitar el procesamiento y análisis posteriores.

6. Extracción de temperatura superficial:

La temperatura de la superficie terrestre (LST, por sus siglas en inglés) se derivó de las bandas térmicas de Landsat 8 (bandas 10 y 11) utilizando el método de split-window (Jiménez-Muñoz et al., 2014). Este proceso incluyó:

a) Conversión de números digitales a radiancia. b) Cálculo de la temperatura de brillo. c) Estimación de la emisividad de la superficie utilizando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). d) Aplicación del algoritmo split-window para obtener la LST.

7. Consideraciones específicas para Tepatitlán:

a) Variabilidad topográfica: Dada la topografía variada de Tepatitlán, se sugiere para posteriores ejercicios realizar una corrección topográfica a las imágenes térmicas utilizando un modelo digital de elevación (DEM) para ajustar las variaciones de temperatura relacionadas con la altitud.

b) Uso del suelo: Se utilizó una clasificación actualizada del uso del suelo del municipio para estratificar el análisis térmico y relacionar los patrones de temperatura con diferentes tipos de cobertura urbana y rural.

8. Almacenamiento y gestión de datos:

Todas las imágenes satelitales y los productos derivados se almacenaron en un sistema de información geográfica (SIG)

estructurado, facilitando el análisis espacial y temporal de los datos térmicos.

5.2.2 Datos demográficos (INEGI 2020)

Para complementar el análisis de las islas de calor urbanas (ICU) en Tepatitlán de Morelos, se incorporaron datos demográficos provenientes del Censo de Población y Vivienda 2020 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Estos datos son cruciales para entender la distribución de la población en relación con los patrones térmicos observados y para evaluar la vulnerabilidad social frente a los efectos de las ICU.

Proceso de recolección y procesamiento de datos demográficos:

1. Fuente de datos:

Los datos se obtuvieron del Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI, específicamente del cuestionario básico aplicado a nivel de manzana para el municipio de Tepatitlán de Morelos.

2. Variables seleccionadas:

Se seleccionaron las siguientes variables demográficas relevantes para el estudio de ICU:

- a) Población total
- b) Densidad poblacional
- c) Estructura por edad y sexo
- d) Población vulnerable (14 años y mayores de 65 años)

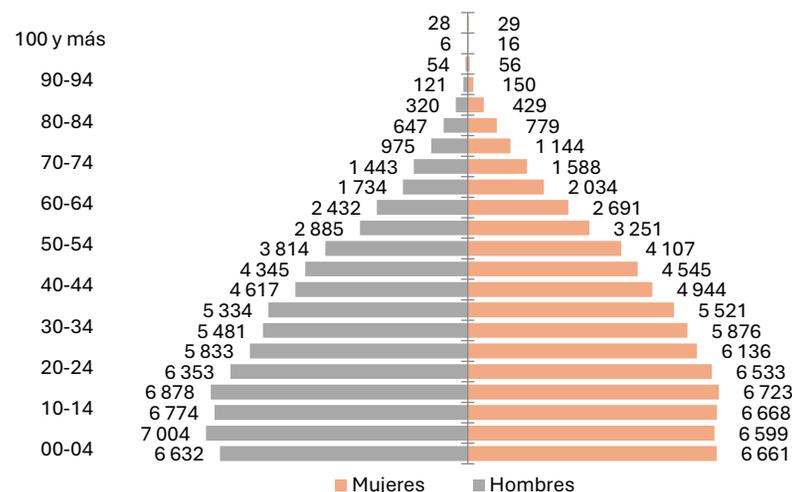


Tabla 1. Pirámide de población año 2020, Tepatitlán de Morelos, Jalisco. Elaboración propia con datos de INEGI 2020

3. Escala espacial:

Los datos se recopilaron a nivel de manzana, que es la unidad geográfica más pequeña para la cual el INEGI proporciona información censal detallada. Esto permite un análisis espacial fino que se puede correlacionar con los datos térmicos derivados de las imágenes de Landsat 8.

4. Preprocesamiento de datos:

a) Limpieza de datos: Se verificó la integridad y consistencia de los datos, tratando los valores faltantes o inconsistentes según las recomendaciones del INEGI.

b) Georreferenciación: Los datos demográficos se vincularon a la cartografía digital de manzanas proporcionada por el INEGI,

asegurando la correcta asociación espacial con los datos térmicos.

c) Cálculo de indicadores: Se derivaron indicadores adicionales como la densidad poblacional (habitantes por km²) y el porcentaje de población.

5. Integración con datos térmicos:

Los datos demográficos se integraron en el Sistema de Información Geográfica (SIG) junto con los datos térmicos derivados de Landsat 8. Esto permitió:

a) Análisis de correlación entre variables demográficas y patrones de temperatura superficial.

b) Identificación de áreas de alta vulnerabilidad social coincidentes con zonas de alta intensidad de ICU.

c) Estimación de la población expuesta a diferentes niveles de intensidad de ICU.

6. Consideraciones específicas para Tepatitlán:

a) Dinámica de crecimiento: Se consideró la tasa de crecimiento poblacional entre 2010 y 2020 para entender la expansión urbana reciente y su relación con la formación de ICU.

b) Distribución rural-urbana: Dada la naturaleza del municipio, que incluye áreas urbanas y rurales, se analizó la distribución de la población en estos contextos y su relación con los patrones térmicos.

c) Actividades económicas: Se relacionaron los datos de ocupación y actividad económica con los patrones de uso del suelo en la formación de ICU.

7. Análisis de vulnerabilidad:

Se desarrolló un índice de vulnerabilidad a ICU combinando variables demográficas (edad, acceso a equipamiento) con datos de exposición térmica. Este índice se utilizó para identificar las áreas y grupos poblacionales más susceptibles a los impactos negativos de las ICU.

8. Limitaciones y consideraciones éticas:

a) Se respetaron los protocolos de confidencialidad, utilizando solo datos agregados que no permiten la identificación de individuos.

b) Se reconocieron las limitaciones inherentes a los datos censales, como el posible subconteo en ciertas áreas o grupos poblacionales.

La integración de estos datos demográficos con la información térmica derivada de Landsat 8 proporciona un contexto social crucial para el estudio de las ICU en Tepatitlán de Morelos. Este enfoque permite no solo mapear y cuantificar el fenómeno físico de las ICU, sino también entender sus implicaciones sociales y identificar áreas prioritarias para la implementación de estrategias de mitigación y adaptación.

5.2.3. Análisis climatológico y de cambio climático

La identificación de peligros climáticos se basa en el uso de datos climatológicos y registros históricos. Para los fines de este análisis, dos parámetros básicos deben ser considerados: la variabilidad de la temperatura y el régimen de las precipitaciones.

Las representaciones de las variables climáticas para Tepatitlán se realizaron a partir de los datos registrados en la estación

climatológica “La Red”, se tomó un periodo de referencia aproximado de entre 30 y 60 años.

La ilustración 4, climograma de la estación La Red de Jalisco, permite definir los valores numéricos de referencia y sus meses correspondientes.

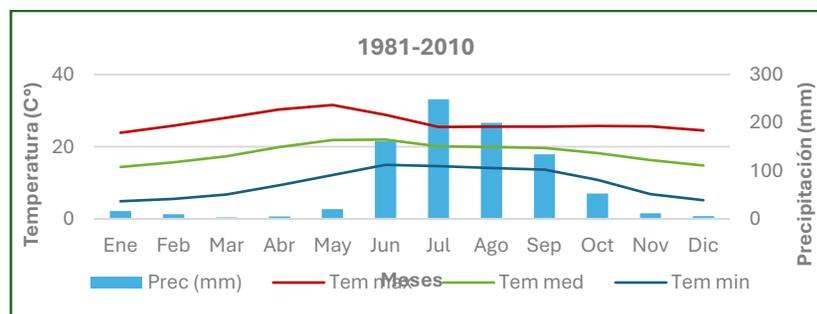


Ilustración 5. Climograma (1981 - 2010), estación 14087, La Red. uente: Comisión Nacional del Agua, Estación La Red, Jalisco (20.72, -102.8133). Clave 14087

Variable / Datos	Datos máximos		Datos mínimos	
	Mes	Valor	Mes	Valor
Precipitación (mm)	Julio	248.8	Marzo	3
Temperatura media (°C)	Junio	22	Enero	14.4
Temperatura máxima (°C)	Mayo	31.6	Enero	23.9
Temperatura mínima (°C)	Junio	15	Enero	4.9

Tabla 2. Climograma 1981 – 2010 (clave 14087), Tepatitlán de Morelos.

Como se puede observar en los datos anteriores que el mes de mayo es el más caluroso llegando a los 31.6 °C, enero es el mes más frío teniendo en promedio 14.4 °C, el mes de julio es donde se registra el mayor promedio de precipitación con 248.8 mm, y el

mes de marzo con los menores registros de precipitación con 3 mm en promedio.

Los registros de temperatura máxima promedio (tabla 3), en el periodo de 1962 a 2020, muestran una tendencia al alza con valores promedios entre los 24 y 30 °C con picos mínimos y máximos de 24.8 y 29.8 °C respectivamente.

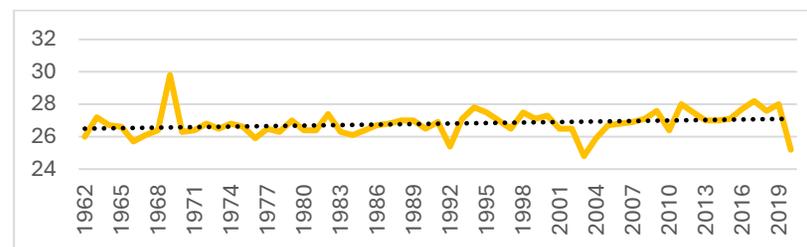


Tabla 3. Promedios anuales de temperatura máxima promedio, Tepatitlán. Elaboración propia en base a Información Estadística Climatológica CONAGUA, 1962-2020

Similarmente los registros de temperatura mínima promedio, en el periodo de 1962 a 2020, muestran una tendencia también al alza con valores promedios entre los 7 y 12 °C con picos mínimos y máximos de 7.5 y 12.0 respectivamente, existe un valor promedio que manifiesta una temperatura atípicamente baja en el año 1969 con 4.2°C, pero esto es debido a que los registros no incluyen todos los meses del año por lo que se considera un detalle poco relevante.

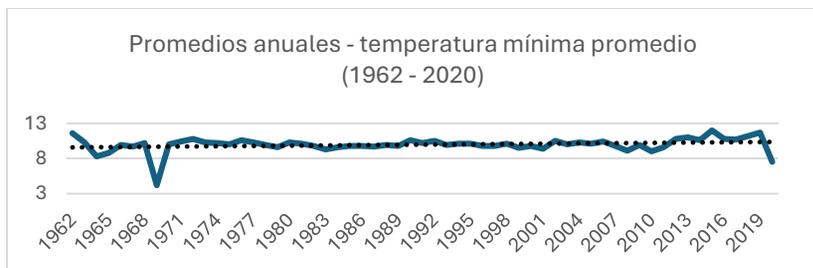


Tabla 4. Promedios anuales de temperatura mínima promedio, Tepatitlán. Elaboración propia en base a Información Estadística Climatológica CONAGUA, 1962-2020

Adicionalmente se revisó la información del Atlas de Riesgos para Tepatitlán de Morelos, referente a temperatura en el territorio del municipio. Se puede apreciar la temperatura media predominante de la zona de estudio; siendo la temperatura cálida. Generalmente este tipo de clima están relacionados principalmente entre los rasgos geomorfológicos de caños y depresiones naturales, presentando con una temperatura promedio de 21.9°C. Estas regiones se caracterizan por presentar principalmente coberturas muy características de zonas subtropicales como son la selva baja subcaducifolia. En cuanto las zonas de transición, las temperaturas promedio oscilan entre los 15 y 17°C, generalmente estas zonas se caracterizan por presentar un mayor uso del suelo destinado a las actividades antrópicas, sobre todo de agricultura y ganadería. Sin embargo, hay pequeños remanentes de cobertura natural aislada dispersas a lo largo del área de estudio. Asimismo, es una región en donde hay mayor número de cuerpos de agua que están dispuestos para el uso del sector primario.

Las temperaturas máximas promedio y más cálidas se encuentran localizadas a lo largo de las zonas depresivas, sobre todo en el cañón del río Verde, en donde el termómetro puede

llegar en promedio los 30°C y la temperatura tiende a descender conforme aumenta la altura del relieve hasta llegar los 20 °C; sobre todo entre las estructuras morfológicas de los aparatos volcánicos aislados.

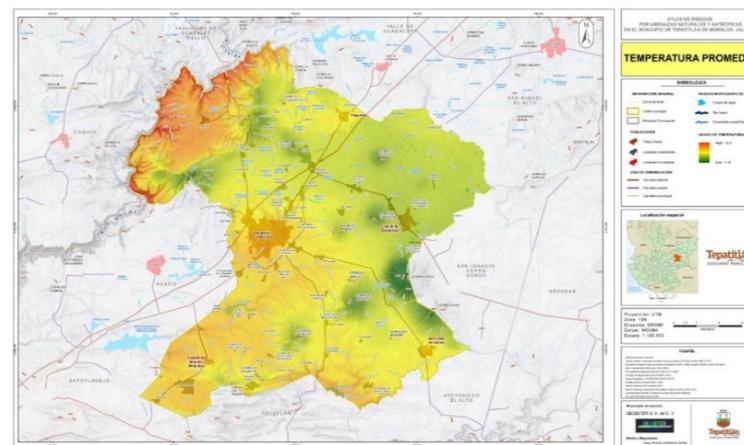


Ilustración 6. Temperatura promedio. Atlas de Riesgos para Tepatitlán de Morelos 2021

5.3 Procesamiento de datos

El procesamiento de datos para el estudio de las islas de calor urbanas (ICU) en Tepatitlán de Morelos integra información de múltiples fuentes, principalmente imágenes satelitales Landsat 8 y datos demográficos del INEGI. Este proceso se diseñó para obtener una comprensión detallada de la distribución espacial y temporal de las ICU, así como su relación con factores socioeconómicos. A continuación, se detalla el proceso:

1. Procesamiento de imágenes Landsat 8:

a) Selección de bandas:

- Banda 4 (Rojo): 0.64 - 0.67 μm
- Banda 5 (Infrarrojo Cercano, NIR): 0.85 - 0.88 μm
- Banda 10 (Infrarrojo Térmico): 10.60 - 11.19 μm

b) Conversión a radiancia espectral en el tope de la atmósfera (TOA):

$$L\lambda = ML * Q_{cal} + AL - O_i$$

Donde:

$$L\lambda = \text{Radiancia espectral TOA (Watts / (m}^2 * \text{sr} * \mu\text{m))}$$

ML = Factor multiplicativo de radiancia (0.0003342 para Banda 10)

AL = Factor aditivo de radiancia (0.1 para Banda 10)

Qcal = Valores de píxeles en números digitales (DN)

O_i = Corrección para Banda 10 (0.29)

c) Conversión a temperatura de brillo:

$$BT = (K2 / \ln(K1 / L\lambda + 1)) - 273.15$$

Donde:

BT = Temperatura de brillo (°C)

K1 = Constante de calibración 1 (774.8853 para Banda 10)

K2 = Constante de calibración 2 (1321.0789 para Banda 10)

d) Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

$$NDVI = \text{Float}(\text{Banda 5} - \text{Banda 4}) / \text{Float}(\text{Banda 5} + \text{Banda 4})$$

e) Cálculo de la proporción de vegetación (PV):

$$PV = ((NDVI - NDVI_{\text{min}}) / (NDVI_{\text{max}} - NDVI_{\text{min}}))^2$$

f) Cálculo de la emisividad de la superficie terrestre (LSE):

$$E = 0.004 * PV + 0.986$$

g) Cálculo de la temperatura de la superficie terrestre (LST):

$$LST = BT / (1 + (0.00115 * BT / 1.4388) * \ln(E))$$

2. Cálculo del perfil de Isla de Calor Urbana (ICU):

$$ICU = (LST - LST_m) / SD$$

Donde:

LST_m = Temperatura media de la superficie terrestre en el área de estudio

SD = Desviación estándar de temperatura

3. Integración de datos demográficos:

a) Georreferenciación de datos INEGI a nivel AGEB.

b) Cálculo de densidad poblacional y porcentajes de población vulnerable.

c) Creación de un índice socioeconómico basado en variables censales.

4. Análisis espacial:

- a) Superposición de capas de LST y datos demográficos en un SIG.
- b) Análisis de correlación espacial entre intensidad de ICU y variables demográficas.
- c) Identificación de hot spots de ICU y áreas de alta vulnerabilidad social.

5. Análisis temporal:

- a) Evaluación de cambios en la intensidad y distribución de ICU a lo largo del tiempo.

6. Validación:

- a) Comparación de LST derivada de Landsat con mediciones in situ (cuando estén disponibles).

7. Visualización de resultados:

- a) Creación de mapas temáticos de LST, ICU y variables socioeconómicas.
- b) Generación de gráficos y diagramas para ilustrar patrones temporales y correlaciones.

8. Control de calidad:

- a) Verificación de la consistencia y precisión de los resultados en cada etapa del procesamiento.
- b) Documentación detallada de todos los pasos del proceso y parámetros utilizados.

10. Consideraciones específicas para Tepatitlán:

a) Ajuste de los umbrales de clasificación de ICU considerando el contexto climático local.

b) Incorporación de datos sobre uso del suelo y actividades económicas específicas del municipio en el análisis.

Este proceso de datos integrado permite una evaluación integral de las ICU en Tepatitlán de Morelos, considerando tanto los aspectos físicos del fenómeno como su contexto socioeconómico. La combinación de análisis espacial, temporal y estadístico proporciona una base sólida para la identificación de patrones, la comprensión de factores causales y la formulación de estrategias de mitigación adaptadas al contexto local.

5.4. Análisis espacial y temporal

El análisis espacial y temporal de las islas de calor urbanas (ICU) en Tepatitlán de Morelos se realizó integrando los datos procesados de las imágenes Landsat 8 y la información demográfica del INEGI. Este análisis busca comprender la distribución, intensidad y evolución de las ICU en el contexto específico de esta ciudad media en rápido crecimiento. A continuación, se detallan los componentes clave de este análisis:

1. Análisis Espacial:

a) Distribución de temperaturas superficiales:

- Se generaron mapas de temperatura de la superficie terrestre (LST) para cada fecha de imagen Landsat 8 procesada.

- Se identificaron patrones espaciales de temperaturas elevadas, correlacionándolos con características urbanas como densidad de construcción, uso del suelo y presencia de vegetación.

b) Intensidad de la Isla de Calor Urbana:

- Se calculó el índice ICU para cada píxel utilizando la fórmula:
 $ICU = (LST - LSTm) / SD$

- Se categorizaron las áreas según la intensidad de ICU: baja (< 1 SD), moderada (1-2 SD), alta (2-3 SD), y muy alta (> 3 SD).

c) Relación con factores urbanos:

- Se analizó la correlación espacial entre la intensidad de ICU y variables como:

- Densidad poblacional
- Tipo de uso del suelo (residencial, comercial, industrial)
- Índice de vegetación (NDVI)
- Características de las edificaciones (altura, materiales)

d) Identificación de hot spots:

- Se utilizaron técnicas de análisis de clusters (como el índice de Moran local) para identificar agrupaciones significativas de altas temperaturas.

e) Análisis de vulnerabilidad:

- Se superpusieron capas de intensidad de ICU con datos demográficos para identificar áreas de alta exposición térmica y alta vulnerabilidad social.

f) Perfiles térmicos urbanos:

- Se generaron transectos térmicos desde el centro urbano hacia la periferia para visualizar el gradiente de temperatura urbano-rural.

2. Análisis Temporal:

a) Variación estacional:

- Se compararon los patrones de ICU entre las diferentes estaciones (primavera, verano, otoño, invierno) para cada año (2023 y 2024).

- Se analizaron las diferencias en intensidad y distribución de ICU entre estaciones, considerando factores como la variación en la radiación solar, patrones de viento y actividades humanas estacionales.

b) Evolución interanual:

- Se realizó una comparación detallada de los patrones de ICU entre 2023 y 2024 para cada estación.

- Se cuantificaron los cambios en la extensión e intensidad de las ICU, relacionándolos con posibles factores como el crecimiento urbano o cambios en el uso del suelo.

c) Análisis de tendencias:

- Se evaluó la presencia de tendencias significativas en la intensidad y extensión de las ICU a lo largo del período de estudio.

- Se utilizaron técnicas de regresión para modelar la evolución temporal de las ICU en diferentes zonas de la ciudad.

d) Eventos extremos:

- Se identificaron y analizaron eventos de calor extremo, evaluando cómo estos afectan la intensidad y distribución de las ICU.

3. Integración espacio-temporal:

a) Mapas de persistencia de ICU:

- Se generaron mapas que muestran la frecuencia o persistencia de ICU intensas a lo largo del período de estudio.

b) Análisis de cambios:

- Se crearon mapas de cambio que ilustran las áreas de mayor incremento o disminución en la intensidad de ICU entre 2023 y 2024.

3. Consideraciones específicas para Tepatitlán:

a) Influencia topográfica:

- Se analizó cómo la topografía variada del municipio afecta la distribución y persistencia de las ICU.

b) Expansión urbana:

- Se relacionaron los cambios en la intensidad y distribución de ICU con los patrones de expansión urbana observados entre 2023 y 2024.

c) Actividades económicas:

- Se evaluó la influencia de las principales actividades económicas de Tepatitlán (como la industria agropecuaria) en la formación y evolución de las ICU.

4. Visualización y comunicación de resultados:

a) Mapas temáticos:

- Se generaron mapas detallados que ilustran la distribución espacial y temporal de las ICU, utilizando una escala de colores consistente para facilitar la comparación.

b) Gráficos y diagramas:

- Se crearon gráficos de series temporales, diagramas de caja y bigotes, y otros visuales para representar la variabilidad temporal y la distribución estadística de las ICU.

c) Infografías:

- Se desarrollaron infografías que sintetizan los hallazgos clave del análisis espacio-temporal para una comunicación efectiva con tomadores de decisiones y el público general.

5.5 Clasificación de rangos de temperatura

La clasificación de rangos de temperatura es un componente crucial en el análisis de las islas de calor urbanas (ICU) en Tepatitlán de Morelos. Esta clasificación permite categorizar y visualizar la distribución espacial de las temperaturas superficiales, facilitando la identificación de áreas críticas y la evaluación de los impactos potenciales en la calidad de vida urbana. El proceso de clasificación se desarrolló considerando las características específicas del área de estudio y los objetivos del análisis de ICU.

Metodología de clasificación:

5.5.1. Definición de rangos:

Se establecieron cuatro categorías principales basadas en los umbrales de confort térmico y riesgo para la salud, adaptados al contexto climático local de Tepatitlán:

- a) Límite de confort: < 32°C
- b) Límite soportable: 32°C - 36°C
- c) Estrés: 36°C - 38°C
- d) Peligrosidad: > 38°C

Estos rangos se fundamentan en estudios previos sobre confort térmico en entornos urbanos (Curiel Ballesteros, 2015) y se ajustaron considerando las condiciones climáticas específicas de Tepatitlán.

5.5.2. Proceso de clasificación:

a) Preparación de datos:

- Se utilizaron las imágenes de temperatura de la superficie terrestre (LST) derivadas del procesamiento de las bandas térmicas de Landsat 8.

- Se aplicó una máscara para delimitar el área urbana y periurbana de Tepatitlán.

b) Reclasificación:

- Se empleó la herramienta de reclasificación en el software de SIG para asignar cada píxel de LST a una de las cuatro categorías definidas.

c) Análisis estacional:

- Se realizó la clasificación para cada imagen estacional (primavera, verano, otoño, invierno) de los años 2023 y 2024.

- Se compararon las distribuciones de clases entre estaciones para evaluar la variabilidad temporal.

5.5.3. Consideraciones específicas:

a) Ajuste por elevación:

- Dada la variabilidad topográfica de Tepatitlán, se aplicó un factor de corrección basado en la tasa de lapso adiabático seco (-0.98°C/100m) para ajustar los umbrales de temperatura en áreas de diferente elevación.

b) Contexto microclimático:

- Se consideraron factores locales como la presencia de cuerpos de agua o áreas verdes significativas que pudieran influir en los patrones térmicos locales.

5.5.4. Análisis de distribución:

a) Cálculo de estadísticas:

- Para cada imagen clasificada, se calculó el porcentaje de área urbana en cada categoría de temperatura.

- Se analizaron los cambios en estas proporciones a lo largo del tiempo y entre estaciones.

b) Identificación de patrones espaciales:

- Se examinó la distribución espacial de las diferentes categorías de temperatura en relación con características urbanas como densidad de construcción, uso del suelo y presencia de vegetación.

5.5.5. Integración con datos demográficos:

a) Superposición con datos censales:

- Se combinaron los mapas de temperatura clasificados con datos demográficos del INEGI a nivel de manzana para estimar la población expuesta a cada categoría de temperatura.

b) Análisis de vulnerabilidad:

- Se identificaron áreas donde las categorías de "estrés" y "peligrosidad" coinciden con alta densidad poblacional o grupos vulnerables.

5.5.6. Visualización:

a) Mapas temáticos:

- Se generaron mapas utilizando una paleta de colores estandarizada para representar las cuatro categorías de temperatura:

- Verde: Límite de confort (< 32°C)
- Amarillo: Límite soportable (32°C - 36°C)
- Naranja: Estrés (36°C - 38°C)
- Rojo: Peligrosidad (> 38°C)

b) Series temporales:

- Se crearon mapas de series temporales para visualizar los cambios en la distribución de las categorías de temperatura a lo largo de las estaciones y entre 2023 y 2024.

5.5.7. Interpretación y aplicación:

a) Identificación de zonas críticas:

- Se utilizaron los mapas clasificados para identificar "hot spots" urbanos que requieren intervención prioritaria.

b) Planificación de intervenciones:

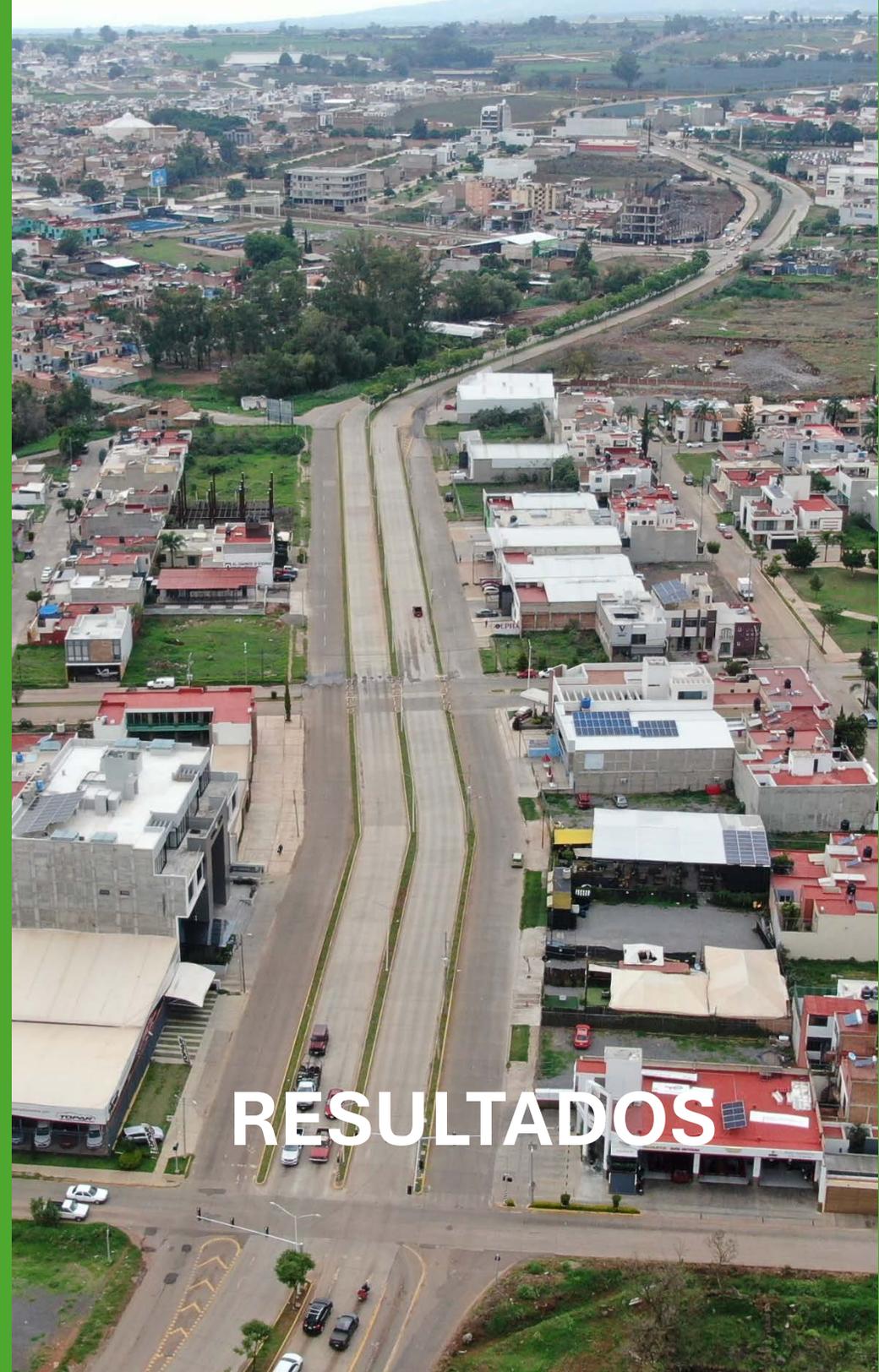
- Se propusieron estrategias de mitigación específicas para áreas clasificadas frecuentemente en las categorías de "estrés" y "peligrosidad".

c) Monitoreo de cambios:

- Se propone establecer una base para el monitoreo continuo de los cambios en la distribución de temperaturas urbanas a lo largo del tiempo.

Esta clasificación de rangos de temperatura proporciona una herramienta visual y analítica poderosa para comprender la distribución y severidad de las ICU en Tepatitlán de Morelos. Al categorizar las temperaturas superficiales en rangos significativos desde el punto de vista del confort térmico y la salud humana, este enfoque facilita la identificación de áreas problemáticas y la priorización de intervenciones urbanas. Además, la consideración de la variabilidad estacional y las características específicas del municipio asegura que la clasificación sea relevante y aplicable al contexto local de Tepatitlán.

Fotografía. Circuito Interior Juan Pablo II
Autor: Paúl Flores



6. Resultados

6.1 Distribución espacial de temperaturas

El análisis de la distribución espacial de temperaturas en Tepatitlán de Morelos revela patrones significativos de islas de calor urbanas (ICU) que varían tanto espacial como temporalmente. Los hallazgos clave basados en el procesamiento de las imágenes Landsat 8 y la clasificación de rangos de temperatura para el período 2023-2024 son:

a) Gradiente urbano-rural:

Se observa un claro gradiente de temperatura desde el centro urbano hacia la periferia. El núcleo urbano de Tepatitlán consistentemente presenta temperaturas más elevadas en comparación con las áreas rurales circundantes, con diferencias que oscilan entre 2°C y 5°C, dependiendo de la estación.

b) Variación estacional:

La intensidad y extensión de las ICU muestran una marcada variabilidad estacional:

- Verano: Presenta la mayor extensión de áreas clasificadas como "límite de confort" (<32°C), con focos puntuales de "estrés" (36-38°C) en el centro urbano.

- Otoño: Muestra un aumento significativo en las áreas clasificadas como "estrés" y "peligrosidad" (>38°C), especialmente en el centro y zonas industriales.

- Invierno: Predominan temperaturas en el rango de "límite soportable" (32-36°C) en áreas urbanas, mientras que las zonas rurales se mantienen mayormente en el "límite de confort".

- Primavera: Se observa un incremento en las áreas clasificadas como "estrés", particularmente hacia la periferia urbana.

c) Hot spots identificados:

- El centro histórico consistentemente muestra las temperaturas más elevadas.

- Las zonas identificadas al norte y oeste emergen como hot spots secundarios.

- Los principales ejes viales y avenidas con polos generadores y atractores de servicios conforman "corredores de calor".

d) Áreas de mitigación térmica:

- Los espacios verdes urbanos, como Parques y Unidades Deportivas arboladas, muestran un efecto de enfriamiento notable.

- La Presa El Jihuite y otros cuerpos de agua actúan como reguladores térmicos.

6.2 Análisis comparativo 2023-2024

La comparación entre los patrones térmicos de 2023 y 2024 revela tendencias preocupantes:

a) Expansión de zonas cálidas:

Se observa un incremento en la extensión de áreas clasificadas como "estrés" y "peligrosidad", particularmente en la primavera y otoño de 2024 en comparación con 2023.

b) Intensificación del efecto ICU:

El contraste térmico entre el centro urbano y la periferia se acentúa en 2024, sugiriendo una intensificación del efecto de isla de calor urbana.

c) Reducción de áreas de confort:

Las zonas clasificadas como "límite de confort" disminuyen notablemente de 2023 a 2024, especialmente en las áreas periurbanas.

d) Cambios estacionales:

- Primavera: En 2024, se observa un aumento significativo de áreas en "estrés" y "peligrosidad" en comparación con 2023.

- Verano: Aunque sigue siendo la estación con mayor extensión de áreas de "confort", en 2024 se nota un incremento de zonas de "estrés".

- Otoño: Presenta el cambio más significativo, con un aumento de áreas en "peligrosidad" en 2024.

- Invierno: Muestra cambios menos pronunciados, pero aún se observa un incremento en áreas de "límite soportable" en 2024.

6.3 Identificación de zonas críticas

Basado en el análisis espacial y temporal, se identificaron las siguientes zonas críticas:

a) Centro histórico:

Consistentemente presenta las temperaturas más altas, frecuentemente en la categoría de "peligrosidad". La alta densidad de construcciones y superficies impermeables contribuyen a este patrón.

b) Zonas industriales:

Emergen como una zona secundaria, mostrando un aumento significativo en temperaturas clasificadas como "estrés" y "peligrosidad" de 2023 a 2024.

c) Corredores viales principales:

Los ejes viales como Circuito Interior y Av. Anacleto González Flores muestran un incremento constante en temperaturas, formando "corredores de calor".

d) Nuevos desarrollos urbanos:

Áreas de reciente urbanización en la periferia, especialmente al sur y este, muestran una rápida transición de "límite de confort" a "límite soportable" y "estrés" entre 2023 y 2024.

e) Zonas de contraste térmico:

Se identificaron áreas donde el cambio de uso de suelo (de rural a urbano) ha generado un marcado contraste térmico con las zonas rurales adyacentes, particularmente en los bordes urbanos.

6.4 Estimación de población afectada

La superposición de los datos térmicos con la información demográfica del INEGI 2020 revela un aumento significativo en la población expuesta a condiciones térmicas desfavorables:

a) Exposición a condiciones de "estrés" y "peligrosidad":

- 2023: Aproximadamente 6,314 habitantes residían en áreas clasificadas como "estrés" o "peligrosidad" durante los períodos más cálidos.

- 2024: Esta cifra casi se duplicó, alcanzando aproximadamente 12,286 habitantes.

b) Distribución por zonas:

- Centro histórico: Concentra la mayor densidad de población afectada, con un estimado de 3,500 habitantes en 2023 y 4,200 en 2024 expuestos a condiciones de "peligrosidad" durante los picos de calor.

- Distrito industrial norte: La población afectada aumentó de aproximadamente 800 en 2023 a 1,500 en 2024.

- Nuevos desarrollos periféricos: Muestran el incremento más rápido, pasando de cerca de 1,000 habitantes afectados en 2023 a 3,500 en 2024.

c) Grupos vulnerables:

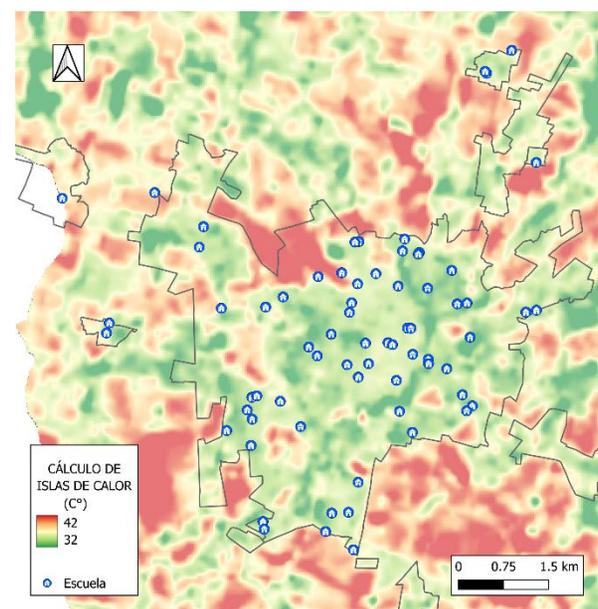
- Se estima que alrededor del 25% de la población expuesta pertenece a grupos vulnerables (niños menores de 5 años, adultos mayores de 65 años, y personas con condiciones de salud preexistentes).

- La proporción de población vulnerable en estas zonas expuestas aumentó de 20% en 2023 a 28% en 2024.

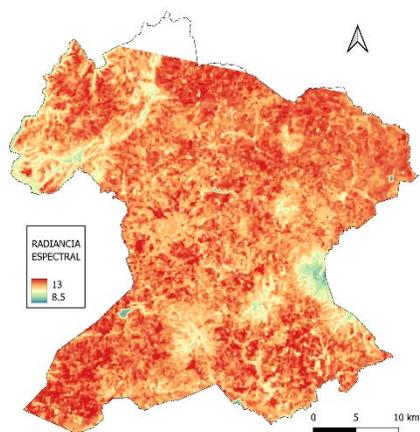
d) Impacto socioeconómico:

- Se observa una correlación entre las áreas de mayor incremento térmico y zonas de menor ingreso económico, sugiriendo una vulnerabilidad desproporcionada de estos sectores.

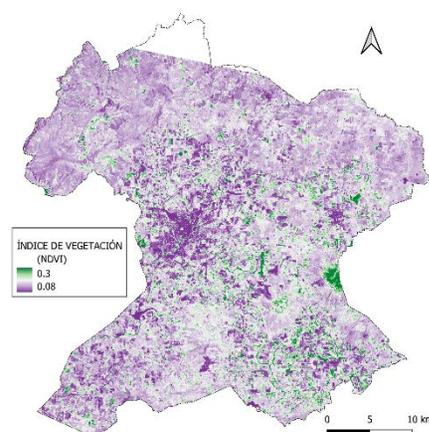
Estos resultados subrayan la necesidad de implementar estrategias de mitigación y adaptación para mejorar el confort térmico urbano y reducir los riesgos asociados a las altas temperaturas en Tepatitlán de Morelos. La rápida expansión de zonas críticas y el aumento significativo de la población afectada entre 2023 y 2024 indican que las intervenciones deben ser prioritarias y enfocadas en las áreas identificadas como más vulnerables.



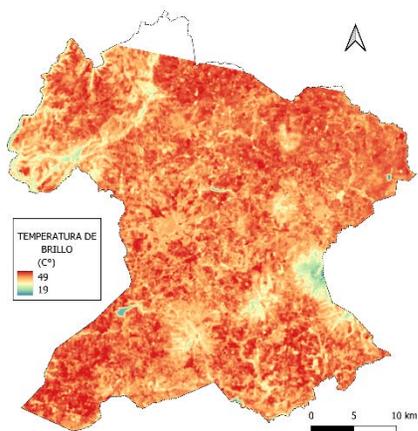
*Ilustración 8. Centros Educativos / Islas de Calor.
Elaboración propia*



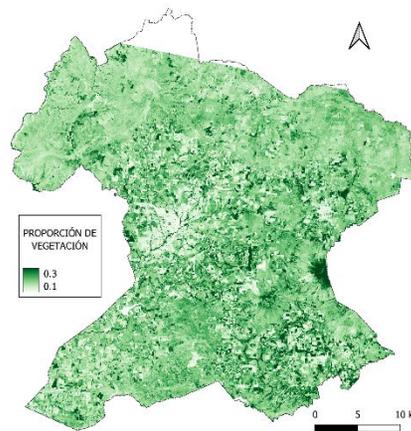
*Ilustración 11. Radiancia Espectral.
Elaboración propia con SIG*



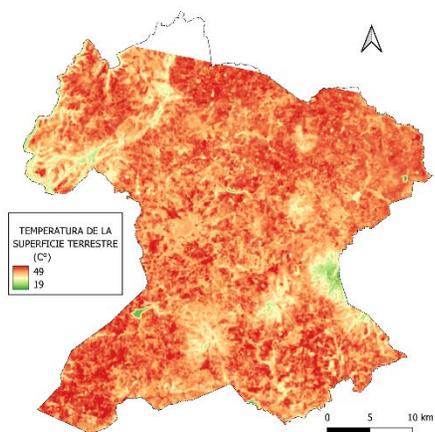
*Ilustración 12. Índice de vegetación. NDVI.
Elaboración propia con SIG.*



*Ilustración 10. Temperatura de brillo.
Elaboración propia con SIG*



*Ilustración 9. Proporción de vegetación.
Elaboración propia con SIG*



*Ilustración 14. Temperatura de la superficie.
Elaboración propia con SIG*

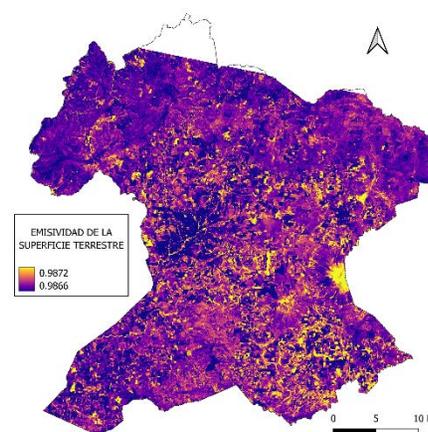
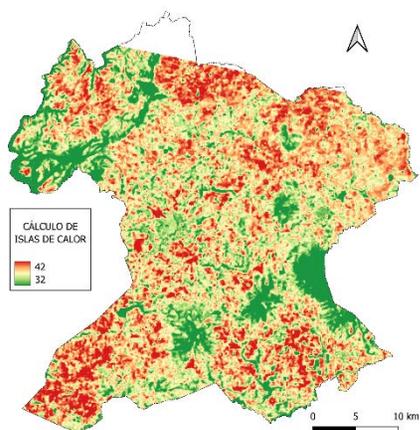


Ilustración 13. Emisividad de la superficie terrestre. Elaboración propia con SIG



*Ilustración 15. Cálculo de Islas de Calor.
Elaboración propia con SIG.*

Ilustración 6: Radiancia espectral

La Figura 6 representa la radiancia espectral del área de estudio. La radiancia espectral mide la cantidad de energía electromagnética emitida por la superficie terrestre en una longitud de onda específica, generalmente en el infrarrojo térmico para estudios de temperatura superficial (Jiménez-Muñoz et al., 2014). Los valores de radiancia se expresan típicamente en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$. Esta imagen muestra la variación espacial de la energía emitida, donde las áreas más brillantes indican una mayor emisión de energía, frecuentemente asociada con superficies más cálidas o materiales con alta capacidad de emisión térmica. Este paso es crucial en el proceso de derivación de la temperatura superficial a partir de datos de sensores remotos.

Ilustración 10: Temperatura de brillo

La Figura 10 ilustra la temperatura de brillo del área de estudio. La temperatura de brillo, también conocida como temperatura de radiancia, es la temperatura que tendría un cuerpo negro para emitir la misma cantidad de radiación que la observada (Sobrino et al., 2008). Esta imagen es un paso intermedio entre la radiancia espectral y la temperatura superficial final. Los valores se expresan en grados Kelvin o Celsius. La distribución espacial de la temperatura de brillo proporciona una primera aproximación a los patrones térmicos de la zona, aunque aún requiere correcciones por emisividad para obtener la temperatura superficial real. Las áreas con temperaturas de brillo más altas generalmente corresponden a superficies urbanas densas o materiales con alta capacidad de absorción y emisión térmica.

Ilustración 12: Índice de vegetación (NDVI)

La Figura 12 muestra el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para el área de estudio. El NDVI varía de 0.08 a 0.3, donde los valores más altos (verde) indican mayor densidad de vegetación y los más bajos (púrpura) representan áreas con poca o nula vegetación. Se observa una distribución heterogénea de la vegetación, con zonas de mayor concentración en la periferia y algunas áreas dispersas dentro de la zona urbana. Esta distribución es relevante para el análisis de las islas de calor urbanas, ya que la vegetación juega un papel crucial en la regulación térmica (Oke et al., 2017).

Ilustración 9: Proporción de vegetación

La Figura 9 presenta la proporción de vegetación en el área de estudio, con valores que oscilan entre 0.1 y 0.3. Esta imagen complementa la información del NDVI, proporcionando una representación más detallada de la cobertura vegetal. Se observan patrones similares a los del NDVI, con una mayor proporción de vegetación en las áreas periféricas y algunas zonas verdes dentro del tejido urbano. Esta distribución es fundamental para comprender la relación entre la cobertura vegetal y las temperaturas superficiales en el contexto urbano (Santamouris, 2015).

Ilustración 13: Emisividad de la superficie terrestre

La Figura 13 ilustra la emisividad de la superficie terrestre, con valores que varían entre 0.9866 y 0.9872. La emisividad es un parámetro clave en la estimación de la temperatura superficial mediante teledetección (Sobrino et al., 2004). Se observa una variación sutil pero significativa en la emisividad a través del área de estudio, lo que refleja la diversidad de materiales y coberturas del suelo presentes en el entorno urbano y periurbano.

Ilustración 14: Temperatura de la superficie terrestre (C°)

La Figura 14 muestra la distribución de la temperatura de la superficie terrestre, con valores que oscilan entre 19°C y 49°C. Este mapa térmico revela claramente el fenómeno de isla de calor urbana, con temperaturas más elevadas en el centro urbano y áreas densamente construidas, y temperaturas más bajas en la periferia y zonas con mayor vegetación. Esta distribución térmica

es consistente con los patrones típicos de las islas de calor urbanas descritos en la literatura (Grimmond, 2007).

Ilustración 15: Cálculo de islas de calor

La Figura 15 presenta el cálculo de las islas de calor, con valores que varían de 32 a 42. Este mapa sintetiza la información térmica, categorizando las áreas según su intensidad de isla de calor. Las zonas en rojo indican las áreas más afectadas por el fenómeno de isla de calor, mientras que las áreas verdes representan zonas con temperaturas más moderadas. Esta visualización es particularmente útil para identificar las áreas críticas que requieren intervención prioritaria en términos de mitigación del calor urbano (Norton et al., 2015).

6.5. Análisis espacial y demográfico del estrés térmico urbano

El estudio incluye una serie de mapas que ilustran diferentes aspectos del fenómeno de isla de calor urbana en Tepatitlán de Morelos. La Imagen 16 muestra la densidad poblacional por manzana, representada en una escala de colores que va desde el blanco (0 habitantes/hectárea) hasta el rojo intenso (>400 habitantes/hectárea). Se observa una mayor concentración de población en el centro de la ciudad y en algunas áreas periféricas específicas.

La Imagen 18 presenta la temperatura en grados Celsius por manzana durante el verano. La escala cromática abarca desde 29°C (verde) hasta 43°C (rojo). Se evidencia un claro patrón de isla de calor urbana, con temperaturas más elevadas en el centro de la ciudad y en algunas zonas industriales o comerciales, mientras

que las áreas periféricas y con mayor vegetación muestran temperaturas más bajas.

La Imagen 19 muestra la temperatura en grados Celsius por manzana durante la primavera. La escala va de 14°C (verde) a 26°C (rojo). Aunque las temperaturas son generalmente más bajas que en verano, se mantiene el patrón de isla de calor, con el centro urbano y algunas áreas específicas mostrando temperaturas más elevadas que las zonas periféricas.

La Imagen 16 representa el número de habitantes por manzana, utilizando una escala de colores similar a la de densidad poblacional. Esta imagen proporciona una visión más detallada de la distribución de la población en la ciudad, complementando la información de densidad poblacional.

Estas representaciones visuales permiten un análisis espacial detallado de la relación entre la distribución de la población, la morfología urbana y los patrones térmicos en Tepatitlán de Morelos. La comparación entre las imágenes de temperatura de verano y primavera revela la variabilidad estacional del efecto de isla de calor, mientras que su correlación con los mapas de población sugiere una relación entre la intensidad del calor urbano y la densidad poblacional (Oke et al., 2017; Santamouris, 2015).

La superposición de estos datos proporciona información para identificar áreas críticas que requieren intervención prioritaria en términos de mitigación del calor urbano y adaptación al cambio climático. Además, esta información puede ser crucial para la planificación urbana sostenible, el diseño de espacios verdes y la implementación de estrategias de refrigeración urbana (Norton et al., 2015).

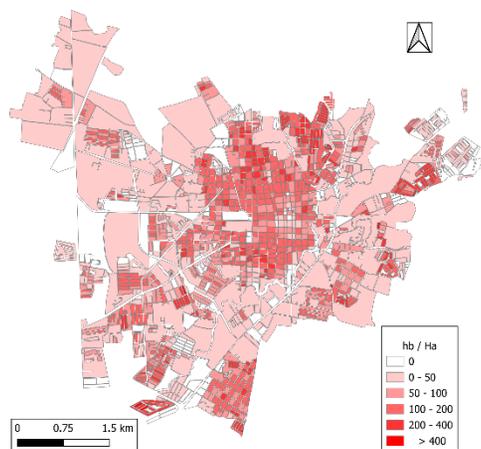


Ilustración 16. Densidad población por manzana. Hab/ha. Elaboración propia

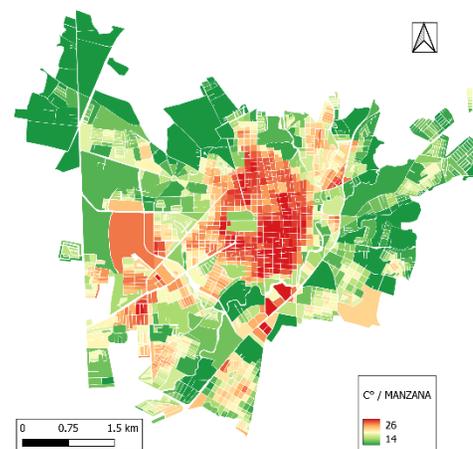


Ilustración 19. Temperatura promedio por manzana. Elaboración propia

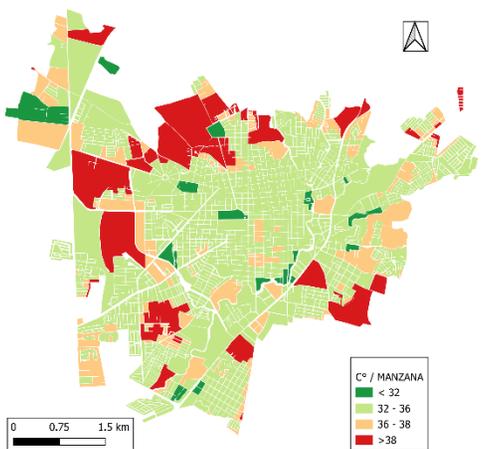


Ilustración 17. Temperatura promedio por manzana. Elaboración propia

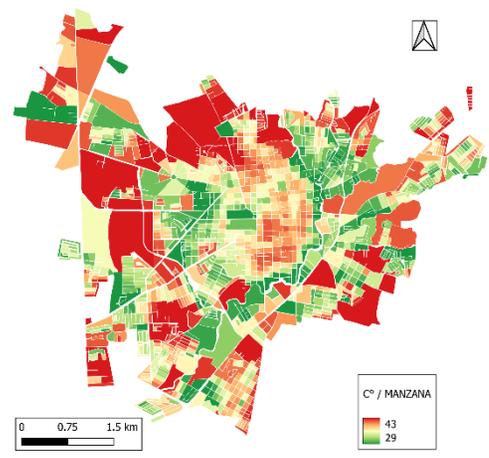


Ilustración 18. Temperatura promedio por manzana. Elaboración propia

DISCUSIÓN

7. Discusión

7.1 Interpretación de resultados

Los resultados obtenidos del análisis de islas de calor urbanas (ICU) en Tepatitlán de Morelos revelan un acercamiento a la información científica sobre el fenómeno de ICU:

a) Intensificación de las ICU: El incremento de las ICU entre 2023 y 2024 sugiere que el proceso de urbanización en Tepatitlán está ocurriendo a un ritmo que supera la capacidad de adaptación térmica del entorno urbano. Este fenómeno es consistente con estudios previos en ciudades de rápido crecimiento (Santamouris, 2015).

b) Patrones espaciales: La concentración de las temperaturas más elevadas en el centro histórico y a lo largo de los principales corredores comerciales refleja la influencia de la densidad urbana y las actividades antropogénicas en la formación de ICU. Este patrón es similar al observado en otras ciudades medias mexicanas (Jáuregui, 1997), pero la rapidez con que se están expandiendo las zonas con altas temperaturas hacia la periferia es notable.

c) Variabilidad estacional: La marcada variación estacional en la intensidad y distribución de las ICU sugiere una interacción compleja entre los factores climáticos regionales y las características urbanas locales. La exacerbación del efecto ICU durante el otoño, particularmente en 2024, podría estar relacionada con cambios en los patrones de uso de energía y actividades urbanas específicas de esta temporada.

d) Impacto poblacional: El casi doblamiento de la población expuesta a condiciones térmicas desfavorables en solo un año es

un hallazgo relevante. Este incremento sugiere que el crecimiento urbano y los cambios en el uso del suelo están ocurriendo sin una adecuada consideración de sus impactos térmicos, exponiendo a una proporción creciente de la población.

7.2 Factores locales que influyen en el fenómeno

Varios factores específicos de Tepatitlán de Morelos parecen estar contribuyendo significativamente a la formación y intensificación de las ICU:

a) Topografía: La ubicación de Tepatitlán en una zona de relieve variado influye en la distribución de las ICU. Las áreas más bajas tienden a acumular calor, mientras que las zonas más elevadas muestran temperaturas más moderadas. Esta variabilidad topográfica complica los patrones de circulación de aire, potencialmente exacerbando el efecto de ICU en ciertas áreas (Goldreich, 2009).

b) Materiales de construcción: El uso predominante de materiales con alta capacidad de absorción térmica, como concreto y asfalto, especialmente en el centro histórico, avenidas y nuevos desarrollos, contribuye significativamente a la retención de calor. La falta de masa arbórea en estos sitios y la falta de implementación de materiales reflectantes o "fríos" en nuevas construcciones parece estar agravando el problema.

c) Pérdida de vegetación: La rápida urbanización está llevando a una reducción significativa de la cobertura vegetal, especialmente en la periferia urbana. La pérdida de este efecto mitigante natural está contribuyendo a la expansión de las zonas cálidas (Bowler et al., 2010).

d) Actividades económicas: La presencia de agroindustrias, y la intensificación de actividades comerciales están generando

focos de calor antropogénico que contribuyen a la formación de ICU secundarias.

e) Patrón de crecimiento urbano: El modelo de expansión urbana de Tepatitlán, caracterizado por un crecimiento horizontal y la conversión rápida de tierras agrícolas a usos urbanos, está creando una "frontera térmica" en constante expansión.

7.3 Implicaciones para la planificación urbana

Los hallazgos de este estudio tienen implicaciones significativas para la planificación urbana en Tepatitlán:

a) Llamada a la acción: La intensificación de las ICU y el aumento de la población expuesta subrayan la necesidad de implementación de acciones. La planificación urbana debe priorizar la mitigación de ICU como un componente central de sus estrategias de desarrollo.

b) Enfoque en áreas críticas: Se requiere una intervención prioritaria en las zonas identificadas como críticas, especialmente el centro histórico y los nuevos desarrollos periféricos. Esto podría incluir la implementación de techos verdes, aumento de la cobertura arbórea, y el uso de pavimentos permeables (en donde las condiciones lo permitan).

c) Regulaciones de construcción: Es necesario revisar y actualizar los reglamentos de construcción para promover el uso de materiales y diseños que reduzcan la absorción y retención de calor. Esto es particularmente crucial para los nuevos desarrollos en la periferia urbana.

d) Preservación y expansión de áreas verdes: La planificación debe priorizar la preservación de espacios verdes existentes y la creación de nuevos, especialmente en áreas de alta densidad y

en los nuevos desarrollos. La implementación de corredores verdes podría ayudar a mitigar los "corredores de calor" identificados a lo largo de las principales vías.

e) Gestión del crecimiento urbano: Es crucial adoptar un enfoque más sostenible para la expansión urbana, promoviendo un desarrollo más compacto y la preservación de áreas naturales en la periferia. Esto podría incluir la implementación de "cinturones verdes" para limitar la expansión urbana descontrolada.

f) Consideraciones sociales: La planificación debe abordar las inequidades observadas en la exposición a ICU, priorizando intervenciones en áreas de bajos ingresos que muestran mayor vulnerabilidad térmica.

g) Adaptación de espacios públicos: Es necesario rediseñar espacios públicos, especialmente en el centro histórico, para proporcionar más áreas de sombra y enfriamiento, mejorando así la habitabilidad durante los períodos de calor intenso.

h) Integración con políticas de cambio climático: Las estrategias de mitigación de ICU deben integrarse con los planes más amplios de adaptación al cambio climático de la ciudad, reconociendo que las ICU pueden exacerbar los impactos del calentamiento global a nivel local.

En conclusión, los resultados de este estudio revelan que Tepatitlán de Morelos está experimentando una intensificación de las islas de calor urbanas. Este fenómeno, impulsado por factores locales específicos, podría afectar de forma desproporcionada a la población. La planificación urbana tiene un papel crucial en la mitigación de estos impactos, requiriendo un enfoque integrado que aborde tanto los aspectos físicos del entorno urbano como las consideraciones sociales y

económicas. La implementación oportuna de estrategias de mitigación y adaptación será fundamental para garantizar un desarrollo urbano sostenible y resiliente en Tepatitlán.

7.4. Representación de los cambios de temperatura.

La comparativa de las muestras permite identificar cambios de temperatura en el territorio en 3 estaciones del año que corresponden a invierno primavera y verano, mientras que durante el otoño la temperatura es más homogénea en la mayor parte del territorio.

- Durante el invierno se pueden observar zonas de temperatura máxima intercaladas con zonas de temperatura media.
- Durante primavera se incrementa la superficie de las zonas con temperatura máxima.
- Durante verano la zona con temperatura máxima se concentra en la cabecera municipal y en la parte Sureste del municipio.
- Durante el otoño la temperatura máxima cubre la mayoría del territorio de forma muy homogénea, a excepción de la zona norte del municipio.

De esta manera podemos definir las zonas con valores máximos de temperatura, que a partir de las formulas aplicadas se denominaría Islas de Calor Urbano (ICU), dentro del territorio de Tepatitlán; ahora bien, nos concentraremos en la cabecera municipal, pues el término de Islas de Calor Urbana considera factores que existen en las ciudades y no en las zonas rurales.

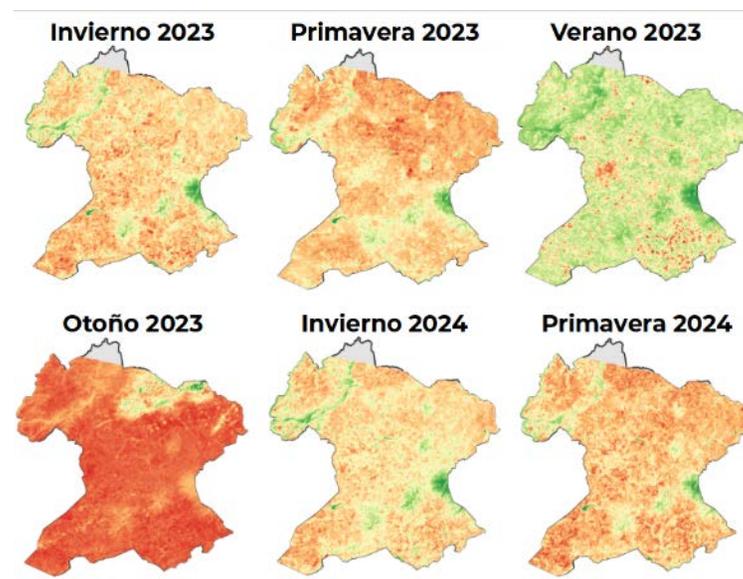


Ilustración 20. Representación de los cambios de temperatura, elaboración propia

7.5. Representación de los cambios de temperatura, trasladando valores de temperatura a polígonos de manzana en cabecera municipal.

A partir de este procedimiento podemos observar que las temperaturas máximas se ubican en la periferia de la cabecera municipal durante el invierno y la primavera, durante el otoño las temperaturas que si bien se distribuyen de manera regular dentro de la localidad también presentan valores máximos en la periferia y en la parte central de la cabecera, durante el verano la temperatura máxima se concentra en la zona este y centro contrastando con los datos de las otras 3 estaciones.

Así pues, el cálculo de islas de calor arroja zonas dentro de la cabecera municipal que durante la mayor parte del año alcanzan las temperaturas más elevadas; permitiéndonos inferir las Islas de Calor Urbanas en la ciudad.

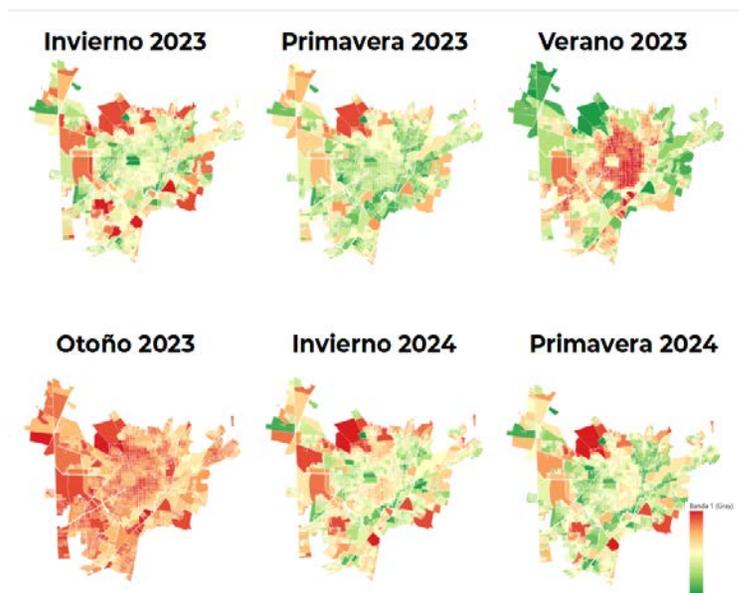


Ilustración 21. Cambios de temperatura / polígonos de manzana.
Elaboración propia

7.6. Representación de los rangos de temperatura considerando un límite de confort térmico en la ciudad de Tepetitlán de Morelos

Para definir los rangos que nos permitan identificar un límite de confort térmico se clasificó el valor de la temperatura, utilizando

como referencia el estudio de Islas de Calor Urbano del municipio de Zapopan, Jalisco donde refieren a la definición de isla de calor utilizada por Arturo Curiel Ballesteros, que establece como “límite de confort térmico” los 32 grados centígrados, como límite soportable 36 grados, que es la temperatura corporal y 38 grados como temperatura de estrés y peligrosidad.

Zonas con valores de temperatura menores a 32°C – Límite de confort.

Zonas con valores de temperatura entre los 32°C y 36°C – Límite soportable.

Zonas con valores de temperatura entre los 36°C y 38°C – Estrés.

Zonas con valores de temperatura superiores a 38°C – Peligrosidad.

Se identifican zonas clasificadas en los rangos estrés y peligrosidad durante la primavera, ubicándose en la periferia de la ciudad.

A partir de los datos del censo de población de INEGI en 2020, se puede ver un primer dato de población afectada entre un año y otro, respecto a las temperaturas máximas calculadas a partir de imagen satelital Landsat 8, aplicando los cálculos para Islas de Calor Urbana.

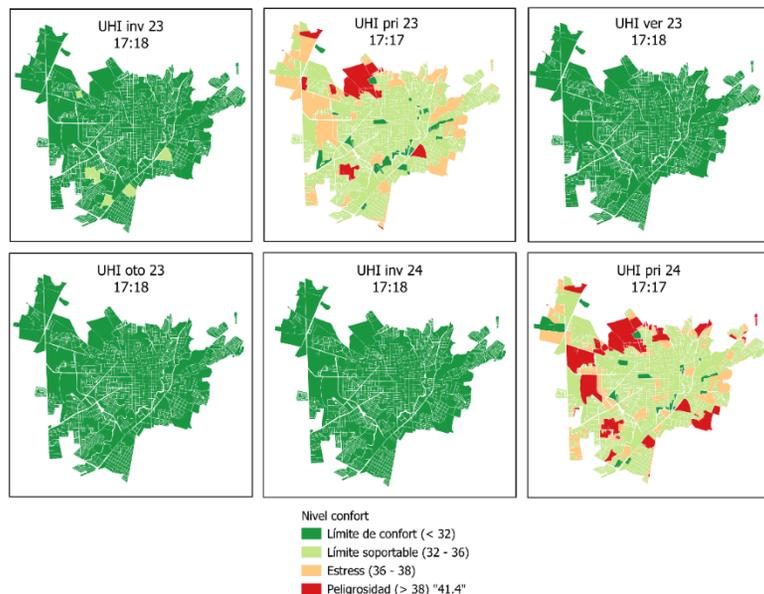


Ilustración 22. Correlación entre rangos de temperatura y confort térmico en Tepatlán. Elaboración propia.

7.7. Análisis multitemporal comparativo: Primavera 2023, Primavera 2024.

A partir de esta comparativa nos damos cuenta de 4 situaciones:

- Las zonas clasificadas en el rango de Peligrosidad se incrementaron de 2023 a 2024.
- Las zonas clasificadas en el rango de Límite de Confort disminuyeron de 2023 a 2024.

- Las zonas clasificadas en el rango de Estrés están presentes en 2023 ubicadas en la periferia de la ciudad y para 2024 se incrementaron en el área central de la cabecera mientras que varias de las ubicadas en la periferia ahora se clasifican en el rango de Peligrosidad.
- Así pues, algunas zonas clasificadas en el rango Límite soportable en 2023, subieron un nivel en 2024 clasificándose dentro del rango Estrés.

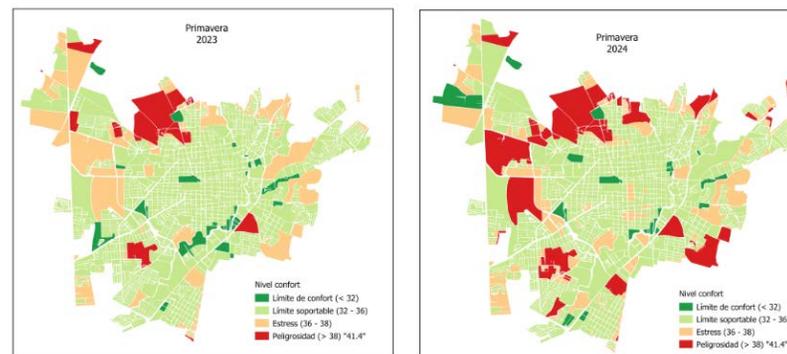


Ilustración 23. Análisis multitemporal comparativo: Primavera 2023, Primavera 2024. Elaboración propia

Aproximado de población en zonas con rango de Estrés y Peligrosidad.

Población	2023	2024
	6,314	12,286



CONCLUSIONES

Fotografía. Parque Lineal - Río Tepatlán

Autor: Paúl Flores

8. Conclusiones

El estudio sobre las islas de calor urbanas (ICU) en Tepatitlán de Morelos para el período 2023-2024 revela hallazgos significativos que sugieren una acción coordinada. Las principales conclusiones son:

8.1. Intensificación de las ICU:

Se observa una intensificación del fenómeno de ICU en Tepatitlán, con un aumento en la extensión e intensidad de las zonas cálidas entre 2023 y 2024. Este cambio rápido sugiere que el proceso de urbanización está ocurriendo a un ritmo que supera la capacidad de adaptación térmica del entorno urbano.

8.2. Patrones espaciales definidos:

Las ICU muestran patrones espaciales claros, con las temperaturas más elevadas concentradas en el centro histórico, zonas industriales y a lo largo de las principales avenidas. La expansión de estas zonas hacia la periferia es particularmente evidente, indicando una propagación del fenómeno más allá del núcleo urbano tradicional.

8.3. Variabilidad estacional marcada:

Se identifica una fuerte variabilidad estacional en la intensidad y distribución de las ICU, con el otoño emergiendo como la estación más crítica, especialmente en 2024. Esta variación subraya la necesidad de estrategias de mitigación adaptadas a las condiciones específicas de cada estación.

8.4. Impacto poblacional expuesto:

El estudio revela un incremento en la población expuesta por condiciones térmicas desfavorables, casi duplicándose de 6,314 habitantes en 2023 a 12,286 en 2024. Este incremento rápido indica una exposición creciente de la población a riesgos de salud asociados con el calor extremo.

8.5. Factores locales influyentes:

Se identifican varios factores locales que contribuyen significativamente a la formación y intensificación de las ICU, incluyendo la topografía variada, el uso predominante de materiales de construcción con alta capacidad de absorción térmica, la pérdida acelerada de vegetación, y el patrón de crecimiento urbano horizontal.

8.6. Desigualdades en la exposición:

El análisis revela una distribución desigual de los impactos de las ICU, con una correlación entre las áreas de mayor incremento térmico y zonas de menor ingreso económico, sugiriendo una vulnerabilidad desproporcionada de ciertos sectores de la población.

8.7. Urgencia de intervención en planificación urbana:

Los hallazgos subrayan la necesidad crítica de integrar la mitigación de ICU como un componente central en la planificación urbana de Tepatitlán. Se requieren intervenciones de adaptación y mitigación, especialmente en las zonas identificadas como críticas, incluyendo el centro histórico y los nuevos desarrollos periféricos.

8.8. Necesidad de estrategias multifacéticas:

La complejidad del fenómeno de ICU en Tepatitlán requiere un enfoque multifacético que incluya la revisión de regulaciones de construcción, la preservación y expansión de áreas verdes, la gestión sostenible del crecimiento urbano, y la adaptación de espacios públicos para mejorar el confort térmico.

8.9. Implicaciones para la resiliencia climática:

El rápido desarrollo de las ICU en Tepatitlán tiene implicaciones significativas para la resiliencia climática de la ciudad. La intensificación de este fenómeno puede exacerbar los impactos del cambio climático global a nivel local, aumentando la vulnerabilidad de la población a eventos de calor extremo.

8.10. Valor del monitoreo continuo:

Este estudio establece una línea base crucial para el monitoreo continuo de las ICU en Tepatitlán. La continuación de este monitoreo será esencial para evaluar la efectividad de las estrategias de mitigación implementadas y para ajustar las políticas urbanas según sea necesario.

En conclusión, Tepatitlán de Morelos se encuentra en un punto coyuntural en términos de su desarrollo térmico urbano. La intensificación de las ICU, combinada con el aumento de la población expuesta, presenta un desafío para la planificación urbana y la salud pública. Es imperativo que las autoridades locales, planificadores urbanos, y la comunidad en general tomen medidas coordinadas para mitigar los efectos de las ICU y adaptar el entorno urbano a estas condiciones cambiantes.

La implementación de estrategias de mitigación basadas en la evidencia, como el aumento de la cobertura vegetal, la adopción de materiales de construcción reflectantes, la implementación de soluciones basadas en la naturaleza y la planificación de un

crecimiento urbano más sostenible, serán fundamentales para reducir la intensidad de las ICU y mejorar la calidad de vida de los habitantes de Tepatitlán. Además, es crucial que estas estrategias se integren con políticas más amplias de adaptación al cambio climático y desarrollo sostenible.

Este estudio proporciona una comprensión aproximada de la situación actual de las ICU en Tepatitlán, también establece una base para futuras investigaciones y acciones de política pública. El desafío ahora radica en traducir estos hallazgos en acciones concretas que puedan crear un entorno urbano más fresco, saludable y resiliente para todos los residentes de Tepatitlán de Morelos.

RECOMENDACIONES

9.Recomendaciones

Basado en los hallazgos del estudio sobre las islas de calor urbanas (ICU) en Tepatitlán de Morelos, se proponen las siguientes recomendaciones:

9.1 Estrategias de mitigación

a) Aumento de la cobertura vegetal:

- Implementar un programa intensivo de arborización urbana, priorizando especies nativas de alto follaje, considerando el Plantograma de especies endémicas de Tepatitlán.
- Crear "corredores verdes" a lo largo de las principales vías para mitigar los "corredores de calor" identificados.
- Fomentar la instalación de techos verdes y jardines verticales, especialmente en el centro histórico y zonas comerciales.

b) Modificación de superficies urbanas:

- Promover el uso de pavimentos permeables y de alta reflectividad en estacionamientos y vías tranquilizadas.
- Implementar un programa de "techos frescos" utilizando materiales reflectantes o pinturas de alta albedo.
- Crear "zonas de enfriamiento" en espacios públicos mediante la instalación de superficies reflectantes y elementos de sombra.

c) Gestión del agua urbana:

- Desarrollar sistemas de retención y uso de aguas pluviales para el riego de áreas verdes.

- Implementar fuentes y espejos de agua en plazas públicas para aprovechar el enfriamiento evaporativo.

d) Diseño urbano bioclimático:

- Revisar y adaptar la orientación de nuevos edificios para maximizar la ventilación natural y minimizar la ganancia solar.
- Fomentar el uso de elementos arquitectónicos de sombreado en fachadas y espacios públicos.

e) Reducción del calor antropogénico:

- Promover la eficiencia energética en edificios para reducir el calor residual.
- Implementar un plan de movilidad urbana sustentable para fomentar la movilidad activa y gestión del tráfico para reducir las emisiones vehiculares en zonas críticas.

Principales tipos de bosques urbanos:

Bosques y arbolados periurbanos	Los bosques y las masas boscosas que se encuentran en la ciudad o rodean los poblados y ciudades y que pueden suministrar bienes y servicios tales como leña, fibras, frutas, otros productos forestales no madereros (PFNM), agua limpia, recreación y turismo.
Parques municipales y bosques urbanos (> 0,5 ha)	Grandes parques urbanos o municipales con una variedad de cubierta terrestre y, al menos, parcialmente equipados con instalaciones para el tiempo libre y la recreación.
Parques y jardines pequeños con árboles (<0,5 ha)	Pequeños parques municipales equipados con instalaciones para la recreación/tiempo libre y jardines y áreas verdes privados

Árboles en las calles o en las plazas públicas	Poblaciones de árboles lineales, pequeños grupos de árboles y árboles individuales en las plazas, aparcamientos, calles, etc.
Otras áreas verdes con árboles	Por ejemplo, los lotes agrícolas urbanos, campos deportivos, terrenos baldíos, prados, riberas de ríos, campos abiertos, cementerios y jardines botánicos.

Tabla 5. Principales bosques urbanos. Adaptado de FAO 2016

9.2 Políticas públicas sugeridas

a) Actualización de reglamentos de construcción:

- Revisar y actualizar el Reglamento de construcción para incluir requisitos de eficiencia térmica y uso de materiales reflectantes.
- Establecer estándares mínimos de área verde idóneos y de calidad por metro cuadrado construido en nuevos desarrollos.

b) Incentivos fiscales y financieros:

- Ofrecer incentivos fiscales para la implementación de techos verdes y tecnologías de enfriamiento pasivo.
- Crear un programa de subsidios para la conversión de superficies impermeables a áreas verdes en propiedades privadas.

c) Planificación del uso del suelo:

- Implementar una política de "crecimiento inteligente" que fomente la utilización de espacio interurbano residual, la redensificación, limite la expansión urbana en asentamientos humanos informales y promueva el desarrollo compacto.

- Establecer una red de áreas verdes protegidas dentro y alrededor de la ciudad.

d) Programa de adaptación climática:

- Desarrollar un plan integral de adaptación al cambio climático que incluya la mitigación de ICU como componente central.

e) Educación y participación ciudadana:

- Lanzar campañas de concientización sobre los impactos de las ICU y las acciones que los ciudadanos pueden tomar.
- Crear programas de participación comunitaria en la plantación y mantenimiento de áreas verdes urbanas.

f) Colaboración intermunicipal:

- Establecer acuerdos de colaboración con municipios vecinos para la gestión regional de áreas verdes y recursos hídricos.

Beneficios potenciales de los bosques urbanos

Aspectos urbanos	Beneficios potenciales de los bosques urbanos
Seguridad alimentaria	Suministran alimentos, agua limpia y leña
Pobreza urbana	Crean empleos y aumentan los ingresos
Degradación del suelo y del paisaje	Mejoran las condiciones del suelo y previenen la erosión
Reducción de la biodiversidad	Preservan y aumentan la biodiversidad
Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)	Remueven los contaminantes del aire y fungen como barrera acústica

Eventos climáticos extremos	Mitigan el clima local y fomentan la resiliencia
Escasez de energía	Ahorran energía por medio de sombra/enfriado y aumentan la disponibilidad de combustible leñoso
Efecto isla de calor	Refrescan el entorno edificado con la sombra y la evapotranspiración
Acceso limitado a las áreas verdes	Brindan mayor acceso a las áreas naturales y verdes
Salud pública	Mejoran la salud física y mental de los residentes
Inundaciones	Mitigan las escorrentías y atenúan las inundaciones
Oportunidades recreativas limitadas	Suministran oportunidades para la recreación y la educación ambiental
Exposición	Ofrecen refugio
Recursos hídricos limitados	Permiten la infiltración y la reutilización de las aguas residuales
Falta de cohesión comunitaria y social	Ofrecen lugares particulares para la interacción al aire libre formal e informal

Tabla 6. Beneficios potenciales de los bosques urbanos. Adaptado de FAO 2016

Estrategias

Tema	Objetivos del Desarrollo Sostenible	Acciones claves
Beneficios económicos y economía verde		Establecer metas para maximizar la infraestructura verde sobre la infraestructura gris en las estrategias de crecimiento urbano
		Promover el desarrollo de una estrategia de pago de servicios ambientales para promover el establecimiento y la protección de las áreas verdes urbanas por los propietarios privados y empresarios
Gestión de riesgos Degradación de la tierra y del suelo		Desarrollar una estrategia de gestión de riesgo de árboles/ arboricultura (p.ej., podado y remoción de los árboles).
		Establecer una cartografía del riesgo de árboles utilizando sistemas de información geográfica y modelaciones para evaluación y predicción de riesgos de árboles
		Sensibilizar a los habitantes de la ciudad sobre los riesgos relacionados con los árboles, especialmente los relacionados con la seguridad pública (p.ej., caída de árboles) para minimizar los riesgos para su salud y seguridad personal
		
		Mantener y diseñar los nuevos espacios verdes públicos con especies apropiadas a la localidad, resistentes al viento, a las sequías e insectos, y que no produzcan materiales alergénicos

		Promover el mantenimiento de la cobertura vegetal natural para limitar los daños ambientales y la degradación del suelo en la construcción y en las intervenciones de desarrollo urbano
		Gestionar la restauración áreas industriales abandonadas, tierras degradadas y terrenos baldíos
El agua y las cuencas hidrográficas		Desarrollar evaluaciones de campo de los bosques urbanos remanentes e identificar oportunidades de restauración potencial
		Evaluar y monitorear las zonas de inundaciones y escorrentías en las áreas urbanas
		Aumentar el porcentaje de superficies permeables y de la cubierta arbórea
		Aplicar enfoques de infraestructura verde y azul tales como pavimentos permeables, techos ecológicos, calles verdes, humedales arbolados y jardines de lluvia, para mitigar los impactos de las escorrentías

Seguridad alimentaria y nutricional		Promover el desarrollo de bosques comestibles
		Desarrollar huertas urbanas que complementen los espacios verdes
Valores socioculturales		Garantizar la distribución equitativa de áreas verdes públicas de calidad en los distritos
		Diseñar espacios verdes multifuncionales para el deleite de toda la comunidad que se vuelvan atractivos y mejoren la interacción y la inclusión social
		Crear áreas verdes alrededor de los edificios públicos, edificios religiosos, municipales y cementerios
		Utilizar los espacios verdes públicos urbanos como instrumentos de valor educativo para las comunidades locales

Tabla 7. Acciones clave. ONU Hábitat ODS 2016

9.3 Soluciones basadas en la naturaleza

Las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) ofrecen un enfoque innovador y sostenible para abordar el desafío de las islas de calor urbanas (ICU) en Tepatitlán de Morelos. Estas estrategias aprovechan los procesos naturales para mitigar los

efectos del calor urbano, proporcionando simultáneamente beneficios adicionales para la biodiversidad, la calidad del aire y el bienestar ciudadano. En el contexto específico de Tepatitlán, se proponen diversas estrategias de SbN adaptadas a las necesidades locales.

La forestación urbana estratégica juega un papel fundamental en esta aproximación. Se plantea la implementación de corredores verdes a lo largo de las principales avenidas identificadas como "corredores de calor", como la Av. Anacleto González Flores, combinando árboles nativos de gran porte, arbustos y plantas herbáceas para maximizar la sombra y la evapotranspiración. Además, se propone aumentar significativamente la cobertura arbórea en plazas, parques y otros espacios públicos, priorizando especies nativas adaptadas al clima local y con alto potencial de enfriamiento. La creación de micro-bosques urbanos densos utilizando el método Miyawaki⁴ en terrenos baldíos o subutilizados (parques de bolsillo), especialmente en áreas identificadas como hot spots de ICU, complementa esta estrategia de forestación.

La infraestructura verde en edificios representa otra línea de acción importante. Se promueve la instalación de techos verdes, especialmente en edificios públicos, comerciales y nuevos desarrollos residenciales, que pueden ser intensivos o extensivos dependiendo de la capacidad estructural del edificio. Los muros verdes o jardines verticales en fachadas de edificios, particularmente en el centro histórico donde el espacio horizontal es limitado, ofrecen una solución adicional. La instalación de pérgolas vegetadas con plantas trepadoras en

⁴ *El método Miyawaki enfatiza la plantación de especies de plantas nativas de la zona local. Esto fomenta un ecosistema más resiliente y naturalmente*

espacios públicos y patios escolares proporciona sombra y enfriamiento evaporativo.

La gestión sostenible del agua se integra en esta aproximación mediante la construcción de jardines de lluvia en áreas propensas a inundaciones, sistemas de biorretención a lo largo de las calles y en estacionamientos, y la renaturalización de ríos urbanos como el Río Tepatitlán, creando zonas de amortiguamiento vegetadas que actúen como corredores de enfriamiento.

La agricultura urbana se incorpora a través del establecimiento de huertos comunitarios en terrenos vacantes y la promoción de techos productivos, especialmente en edificios públicos, comerciales y educativos. Estas iniciativas no solo contribuyen al enfriamiento urbano sino también a la producción local de alimentos.

La implementación de pavimentos permeables y ecológicos, como adoquines permeables en áreas de estacionamiento y calles tranquilizadas, y el uso de materiales de alta reflectividad y permeabilidad en la renovación de calles y aceras, especialmente en zonas críticas para las ICU, complementan las estrategias basadas en vegetación.

La creación de microclimas urbanos se aborda mediante la incorporación de elementos de agua en plazas y parques, y el establecimiento de pequeños bosques comestibles que combinan árboles frutales, arbustos y plantas herbáceas comestibles en parques y áreas comunitarias.

equilibrado. Este método asegura una tasa de éxito más alta y ayuda a que el ecosistema existente de aves y polinizadores prospere.

Se propone la creación de corredores de biodiversidad que conecten los espacios verdes existentes, como el Parque Bicentenario, Parque Lineal, con nuevas áreas verdes, facilitando el movimiento de especies y mejorando el efecto de enfriamiento. La incorporación de plantas nativas atractivas para polinizadores en todos los proyectos de vegetación urbana aumenta la biodiversidad y la resiliencia del ecosistema urbano.

La restauración ecológica periurbana se aborda mediante programas de reforestación en las laderas que rodean la ciudad, utilizando especies nativas para prevenir la erosión y crear un cinturón verde que modere las temperaturas urbanas. Asimismo, se propone la restauración y protección de humedales cercanos a la ciudad, como las áreas alrededor de la Presa El Jihuite, para mejorar la regulación térmica y la gestión del agua.

Para asegurar el éxito de estas soluciones basadas en la naturaleza, es crucial desarrollar un plan de implementación por fases, priorizando las áreas más críticas identificadas en el estudio de ICU. Se requiere establecer colaboraciones entre el gobierno municipal, instituciones académicas, organizaciones ambientales y la comunidad local, así como crear programas de educación y participación ciudadana. La implementación de un sistema de monitoreo continuo utilizando estaciones hidrometeorológicas de temperatura y humedad, así como imágenes satelitales, permitirá evaluar la efectividad de las intervenciones. Es fundamental integrar estas soluciones en los planes de desarrollo urbano y las normativas de construcción de Tepatitlán, y buscar financiamiento a través de programas nacionales e internacionales de adaptación al cambio climático y desarrollo urbano sostenible.

Estas soluciones basadas en la naturaleza, adaptadas al contexto específico de Tepatitlán de Morelos, tienen el potencial de mitigar significativamente el efecto de isla de calor urbana, mejorar la calidad de vida de los residentes y aumentar la resiliencia de la ciudad frente al cambio climático. Su implementación requiere un enfoque integrado y multidisciplinario, así como un compromiso a largo plazo con la sostenibilidad urbana, pero promete beneficios sustanciales para el ambiente urbano y sus habitantes.

9.4 Futuras líneas de investigación

a) Modelado predictivo avanzado:

- Desarrollar modelos de simulación urbana que integren datos climáticos, urbanísticos y socioeconómicos para predecir la evolución futura de las ICU en Tepatitlán.

b) Estudios de microclima urbano:

- Realizar investigaciones detalladas sobre la variación micro climática en diferentes tipologías urbanas de Tepatitlán.
- Analizar el impacto de diferentes configuraciones de vegetación urbana en la mitigación de ICU.

c) Evaluación de impactos socioeconómicos:

- Investigar los impactos económicos de las ICU en términos de consumo energético, productividad laboral y costos de salud.
- Estudiar la relación entre las ICU y los patrones de movilidad urbana en Tepatitlán.

d) Tecnologías de mitigación innovadoras:

- Explorar y evaluar la eficacia de nuevas tecnologías de enfriamiento urbano, como pavimentos foto catalíticos o sistemas de enfriamiento distrital.

e) Monitoreo a largo plazo:

- Establecer un programa de monitoreo continuo de las ICU utilizando una red de sensores terrestres combinada con datos satelitales.

- Desarrollar indicadores locales de ICU para evaluar la efectividad de las estrategias de mitigación implementadas.

f) Estudios comparativos:

- Realizar análisis comparativos con otras ciudades medias de México para identificar mejores prácticas y soluciones adaptables.

g) Investigación participativa:

- Desarrollar metodologías de ciencia ciudadana para involucrar a la comunidad en el monitoreo y mitigación de las ICU.

h) Análisis de resiliencia:

- Investigar la interacción entre las ICU y otros fenómenos climáticos extremos, como sequías e inundaciones, para mejorar la resiliencia urbana.

i) Evaluación de políticas:

- Realizar estudios de seguimiento para evaluar la efectividad de las políticas y estrategias de mitigación implementadas.

Estas recomendaciones buscan proporcionar un marco integral para abordar el desafío de las ICU en Tepatitlán de Morelos. La

implementación efectiva de estas estrategias requerirá un enfoque multidisciplinario, la colaboración entre diferentes sectores de la sociedad y un compromiso a largo plazo con la sostenibilidad urbana. Además, las futuras líneas de investigación propuestas ayudarán a refinar y adaptar continuamente las estrategias de mitigación, asegurando que Tepatitlán pueda desarrollarse como una ciudad resiliente y adaptada a los desafíos climáticos del futuro.

8. Referencias bibliográficas

- Akbari, H. (2005). Energy saving potentials and air quality benefits of urban heat island mitigation. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295-310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Barsi, J. A., Schott, J. R., Palluconi, F. D., & Hook, S. J. (2005). Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. In J. J. Butler (Ed.), *Earth Observing Systems X* (Vol. 5882, pp. 136-142). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.619990>
- Basu, R., & Samet, J. M. (2002). Relation between elevated ambient temperature and mortality: A review of the epidemiologic evidence. *Epidemiologic Reviews*, 24(2), 190-202. <https://doi.org/10.1093/epirev/mxf007>
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Curiel Ballesteros, A. (2015). Islas de calor urbano en Zapopan, Jalisco. Universidad de Guadalajara.
- Debbage, N., & Shepherd, J. M. (2015). The urban heat island effect and city contiguity. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 181-194. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.08.002>
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (5ª ed.). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- García-Cueto, O. R., Jáuregui-Ostos, E., Toudert, D., & Tejeda-Martínez, A. (2007). Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., México and its relationship with land use. *Atmósfera*, 20(2), 111-131.
- Goldreich, Y. (2009). Updating urban climatology—A personal view. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(7), 923-935. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2571.1>
- González, J. E., Luvall, J. C., Rickman, D., Comarazamy, D., Picón, A., Harmsen, E., ... & Tepley, C. (2005). Urban heat islands developing in coastal tropical cities. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 86(42), 397-403. <https://doi.org/10.1029/2005EO420001>
- Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1991). An evapotranspiration-interception model for urban areas. *Water Resources Research*, 27(7), 1739-1755. <https://doi.org/10.1029/91WR00557>
- Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1999). Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology*, 38(9), 1262-1292. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<1262:APOUAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1262:APOUAD>2.0.CO;2)
- H. Ayuntamiento de Tepatitlán. (2018). Plan Municipal de Desarrollo y Gobernanza 2018-2021. Gobierno Municipal de Tepatitlán de Morelos.
- Harlan, S. L., Brazel, A. J., Prashad, L., Stefanov, W. L., & Larsen, L. (2006). Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress. *Social Science & Medicine*, 63(11), 2847-2863. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2006.07.030>
- Hartz, D. A., Brazel, A. J., & Heisler, G. M. (2006). A case study in resort climatology of Phoenix, Arizona, USA. *International Journal of Biometeorology*, 51(1), 73-83. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0036-9>
- Heaviside, C., Macintyre, H., & Vardoulakis, S. (2017). The urban heat island: Implications for health in a changing environment. *Current Environmental Health Reports*, 4(3), 296-305. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>
- IMEPLAN Tepatitlán. (2019). Plan de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Tepatitlán de Morelos. Instituto Municipal de Planeación de Tepatitlán.
- INEGI. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jáuregui, E. (1997). Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31(22), 3821-3831. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00136-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00136-2)

- Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Skoković, D., Mattar, C., & Cristóbal, J. (2014). Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10), 1840-1843. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>
- Kalnay, E., & Cai, M. (2003). Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 423(6939), 528-531. <https://doi.org/10.1038/nature01675>
- Kántor, N., & Unger, J. (2010). Benefits and opportunities of adopting GIS in thermal comfort studies in resting places: An urban park as an example. *Landscape and Urban Planning*, 98(1), 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.07.008>
- Ketterer, C., & Matzarakis, A. (2014). Human-biometeorological assessment of the urban heat island in a city with complex topography—The case of Stuttgart, Germany. *Urban Climate*, 10, 573-584. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.01.003>
- Li, D., & Bou-Zeid, E. (2013). Synergistic interactions between urban heat islands and heat waves: The impact in cities is larger than the sum of its parts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(9), 2051-2064. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-02.1>
- Lombardo, M. A. (1985). *Ilha de calor nas metrópoles: O exemplo de São Paulo*. Editora Hucitec.
- Manley, G. (1958). On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 84(359), 70-72. <https://doi.org/10.1002/qj.49708435910>
- Memon, R. A., Leung, D. Y., & Liu, C. H. (2009). An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating. *Atmospheric Research*, 94(3), 491-500. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.07.006>
- Merlotto, A., Piccolo, M. C., & Pántano, S. C. (2021). Spatial and temporal patterns of the urban heat island intensity in Mar del Plata, Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(4), 207. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08985-4>
- Mills, G. (2008). Luke Howard and The Climate of London. *Weather*, 63(6), 153-157. <https://doi.org/10.1002/wea.195>
- Mitchell, B. C., & Chakraborty, J. (2015). Landscapes of thermal inequity: Disproportionate exposure to urban heat in the three largest US cities. *Environmental Research Letters*, 10(11), 115005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/11/115005>
- Morris, C. J. G., Simmonds, I., & Plummer, N. (2001). Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *Journal of Applied Meteorology*, 40(2), 169-182. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<0169:QOTIOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<0169:QOTIOW>2.0.CO;2)
- Neil, K., & Wu, J. (2006). Effects of urbanization on plant flowering phenology: A review. *Urban Ecosystems*, 9(3), 243-257. <https://doi.org/10.1007/s11252-006-9354-2>
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127-138. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>
- Obradovich, N., Migliorini, R., Mednick, S. C., & Fowler, J. H. (2017). Nighttime temperature and human sleep loss in a changing climate. *Science Advances*, 3(5), e1601555. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601555>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T. R. (1988). The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*, 12(4), 471-508. <https://doi.org/10.1177/030913338801200401>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- ONU. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Organización de las Naciones Unidas.
- Parris, K. M., & Hazell, D. L. (2005). Biotic effects of climate change in urban environments: The case of the grey-headed flying-fox (*Pteropus poliocephalus*) in Melbourne, Australia. *Biological Conservation*, 124(2), 267-276. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.01.035>

9. Glosario de términos

Adaptación: Proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos, buscando moderar daños o aprovechar oportunidades beneficiosas en sistemas humanos.

Albedo: Porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre ella. Las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras.

Análisis de Riesgos y Vulnerabilidades Climáticas (ARVC): Diagnóstico que permite identificar la exposición ante peligros climáticos, así como los riesgos climáticos actuales y futuros, evaluando la vulnerabilidad de la población ante los posibles impactos.

Cambio climático: Variación del estado del clima identificable en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos.

Capacidad adaptativa: Habilidad de los sistemas, instituciones, seres humanos y otros organismos para adaptarse ante posibles daños, aprovechar las oportunidades o afrontar las consecuencias del cambio climático.

Efecto cañón: Fenómeno en el que las calles estrechas flanqueadas por edificios altos atrapan el calor y reducen la ventilación.

Escenarios climáticos: Representaciones plausibles y a menudo simplificadas del clima futuro, basadas en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas.

Evapotranspiración: Proceso combinado de evaporación desde la superficie del suelo y transpiración desde la vegetación.

Exposición: Presencia de personas, medios de subsistencia, especies o ecosistemas, funciones, servicios y recursos ambientales, infraestructura, o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente por el cambio climático.

Factor de visión del cielo: Medida de la cantidad de cielo visible desde un punto en la superficie urbana, influyendo en la pérdida de calor radiativo nocturno.

Gases de efecto invernadero (GEI): Componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre.

Isla de Calor Urbana (ICU): Fenómeno climático caracterizado por un aumento de la temperatura en áreas urbanas en comparación con las zonas rurales circundantes.

Mitigación: Intervención humana encaminada a reducir las fuentes o potenciar los sumideros de gases de efecto invernadero.

Peligro climático: Ocurrencia potencial de un suceso o tendencia física de origen natural o humano, o un impacto físico, que puede causar pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos sobre la salud, así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, prestaciones de servicios, ecosistemas y recursos ambientales.

Resiliencia: Capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales de afrontar un suceso, tendencia o perturbación

peligroso respondiendo o reorganizándose de modo que mantengan su función esencial, su identidad y su estructura.

Riesgo climático: Potencial de consecuencias adversas para sistemas humanos o ecológicos, reconociendo la diversidad de valores y objetivos asociados con tales sistemas.

Rugosidad superficial: Característica de la superficie urbana que afecta los patrones de viento y la dispersión del calor.

Sensibilidad: Grado en que un sistema o especie resulta afectado, positiva o negativamente, por la variabilidad o el cambio climático.

Temperatura de la superficie terrestre (LST): Temperatura radiativa de la superficie terrestre medida por satélite o desde el aire.

Vulnerabilidad: Propensión o predisposición a ser afectado negativamente por el cambio climático. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación.

Zona climática local: Clasificación del paisaje en áreas relativamente homogéneas con respecto a sus características de cobertura superficial, estructura y materiales que influyen en el clima a escala local.



