



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE GEOGRAFÍA

LICENCIATURA EN GEOGRAFÍA

**“Análisis de la Isla de Calor Urbano para el año 2018 y 2022
en la Zona Urbana de Toluca, mediante imágenes Landsat”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciada en Geografía

PRESENTA:

Maria Fernanda Velázquez Pérez

1725057

DIRECTOR DE TESIS:

Doctor Roberto Franco Plata

REVISORES:

Doctor Alexis Ordaz Hernández

Maestra Juana Rosendo Francisco

Toluca, México. Marzo 2025



CONTENIDO

CAPÍTULO I. GENERALIDADES	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. ESTADO DEL ARTE	2
1.3. PROBLEMÁTICA	4
1.4. JUSTIFICACIÓN	5
1.5. HIPÓTESIS	6
1.6. OBJETIVOS GENERALES Y PARTICULARES	6
1.6.1 <i>Objetivo General:</i>	6
1.6.2 <i>Objetivos Particulares:</i>	6
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	8
2.1. ORIGEN	8
2.2. CONCEPTUALIZACIÓN	9
2.3. URBANIZACIÓN	16
2.4. TÉCNICAS	17
2.4.1. <i>Imagen Térmica</i>	17
2.4.2. <i>Sensores remotos</i>	18
2.5. TEORÍAS.....	20
2.5.1. <i>Teoría del Balance de Energía en Superficies Urbanas</i>	20
2.5.2. <i>Teoría del Cambio de Uso del Suelo</i>	21
2.5.3. <i>El Efecto Albedo</i>	21
2.5.4. <i>Vegetación Urbana</i>	21
2.6. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.	22
2.6.1. <i>ArcGIS</i>	24
2.6.2. <i>QGIS</i>	25
2.7. PERCEPCIÓN REMOTA	26
2.7.1. <i>Teledetección</i>	27
2.7.2. <i>Sistemas de teledetección</i>	28
2.7.3. <i>Teledetección satelital</i>	29
2.8. VARIABLES DE LAS ISLAS DE CALOR.....	30
2.9. DIAGRAMA DE INVESTIGACIÓN SOBRE ISLAS DE CALOR	33
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	34
3.1. INTRODUCCIÓN	34
3.2. ÁREA DE ESTUDIO.....	35
3.3. SELECCIÓN DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE.....	36
3.4. MÉTODO EMPLEADO.	37
3.4.1. <i>Cálculo de la Radiancia (TOA)</i>	39
3.4.2. <i>Conversión a Temperatura de Brillo (BT) en la parte superior de la atmósfera (TOA)</i>	40
3.4.3. <i>Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada</i>	41
3.4.4. <i>Proporción de Vegetación (PV)</i>	44
3.4.5. <i>Emisividad</i>	44
3.4.6. <i>Temperatura de la Superficie Terrestre</i>	45
3.4.7. <i>Perfil de las Islas de Calor Urbano</i>	46

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS 52

4.1. ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA..... 52

4.2. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE (LST)..... 60

4.3. ÍNDICE DE CALOR URBANO 68

4.4. MITIGACIÓN Y PLANIFICACIÓN FUTURA 76

CONCLUSIONES..... 78

RECOMENDACIONES 81

REFERENCIAS 83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Sensores y Satélites utilizados para el cálculo de LST (2024).....	32
Tabla 3.1. Información General de Imágenes	38
Tabla 4.1. Categorías del Índice de Vegetación	52
Tabla 4.2. Vitalidad de la Vegetación	53
Tabla 4.3. Porcentaje de áreas de las categorías del NDVI	59
Tabla 4.4. Categorías de la Temperatura de la Superficie Terrestre	61
Tabla 4.5. Particularidades de la Temperatura de la Superficie Terrestre	61
Tabla 4.6. Porcentaje de superficie por categoría de la Temperatura de la Superficie Terrestre.	67
Tabla 4.7. Categorías del Índice de Calor Urbano basado en Stewart y Oke (2012).....	68
Tabla 4.8. Porcentaje de superficie de las diferencias del índice de calor urbano.....	74

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4.1. Porcentaje de áreas con base en categorías del Índice de Vegetación	60
Gráfica 4.2. Comportamiento General de la Temperatura de la Superficie Terrestre.....	67
Gráfica 4.3. Porcentaje de diferencia por categoría del índice de calor urbano.	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diagrama con los elementos del proceso.	33
Figura 3.1. Mapa de Localización de la Zona Urbana de Toluca.....	35
Figura 3.2. Cálculo de NDVI para 2018: A) Enero; B) Marzo; C) Junio; D) Noviembre.	42
Figura 3.3. Cálculo de NDVI para 2022: A) Enero; B) Marzo; C) Junio; D) Noviembre.	43
Figura 3.4. Cálculo de LST para 2018: A) Enero; B) Marzo; C) Junio; D) Noviembre.	47
Figura 3.5. Cálculo de LST para 2022: A) Enero; B) Marzo; C) Junio; D) Noviembre.	48
Figura 3.6. Cálculo de ICU para 2018: A) Enero; B) Marzo; C) Junio; D) Noviembre.....	50
Figura 3.7. Cálculo de ICU para 2022: A) Enero; B) Marzo; C) Junio; D) Noviembre.....	51
Figura 4.1. Índice de Vegetación para el mes de Enero.....	55
Figura 4.2. Índice de Vegetación para el mes de Marzo	56
Figura 4.3. Índice de Vegetación para el mes de Junio.....	57
Figura 4.4. Índice de Vegetación para el mes de Noviembre	58
Figura 4.5. Temperatura de la Superficie Terrestre del mes de Enero.....	63
Figura 4.6. Temperatura de la Superficie Terrestre del mes de Marzo	64
Figura 4.7. Temperatura de la Superficie Terrestre del mes de Junio.....	65
Figura 4.8. Temperatura de la Superficie Terrestre del mes de Noviembre	66
Figura 4.9. Índice de Calor Urbano Enero	70
Figura 4.10. Índice de Calor Urbano Marzo	71
Figura 4.11. Índice de Calor Urbano Junio.....	72
Figura 4.12. Índice de Calor Urbano Noviembre.....	73

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

Las islas de calor urbano (ICU) son un fenómeno que afecta cada vez más a las ciudades a medida que crecen y se urbanizan. La importancia de entender y mitigar las ICU radica en sus impactos profundos en la salud pública, el medio ambiente y la economía urbana.

Este fenómeno hace que las temperaturas en las ciudades se concentren y sean más altas en comparación con el campo debido a la absorción y liberación de calor generado por materiales urbanos, la falta de espacios verdes y la presencia de fuentes de calor como vehículos y edificaciones.

En este estudio analizamos los cambios en la isla de calor urbana del área urbana de Toluca para los años 2018 y 2022 utilizando imágenes satelitales Landsat 8 extraídas del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Estas imágenes permiten visualizar la distribución de la temperatura de manera que se identifiquen áreas críticas donde las temperaturas pueden aumentar significativamente.

El análisis de calor urbano de Toluca es importante porque el aumento de temperatura en las zonas urbanas repercute en la salud de los residentes, el consumo de energía y el medio ambiente. A través de este estudio se pretende generar información relevante que pueda ser utilizada para implementar medidas de mitigación y adaptación que contribuya a reducir el efecto isla de calor urbano en el área urbana de Toluca.

1.2. ESTADO DEL ARTE

El fenómeno de las Islas de Calor Urbano (ICU) se refiere al incremento de las temperaturas mínimas, tanto diurnas como nocturnas, en áreas urbanas densamente pobladas en comparación con sus alrededores. Este aumento se deriva del crecimiento y desarrollo de las ciudades (Linares, Cuervo y Díaz, 2023). La problemática se intensifica debido a que las ICU son el resultado de las alteraciones climáticas generadas por las actividades humanas, lo que convierte este fenómeno en uno de los principales desafíos del siglo XXI (Shalaby, 2011).

Existe una diferencia entre el efecto de isla de calor superficial y el efecto de isla de calor atmosférica. La primera hace referencia a las temperaturas que se reportan sobre las superficies, ya sean urbanas o rurales, mientras que las islas de calor atmosféricas refieren a las diferencias de temperaturas de la columna de aire de las zonas rurales o urbanas (McCartney y Mehta (2020) Citado por Orozco, 2020).

Es necesario desarrollar una serie de iniciativas para estudiar el impacto de las islas de calor urbanas debido al proceso de urbanización en curso y a la gran población que vive en las ciudades, según un informe reciente de la ONU se estima que actualmente el 50% de la población es urbana y la previsión es que para el año 2050 aumente hasta un 70% (ONU, 2018 citado por Hidalgo y Arco, 2022).

“La calle se siente más caliente y ese cambio es una pequeña muestra del llamado efecto Isla de Calor. El tema de las islas de calor no es un concepto nuevo, estudios en la década de los 60 ya apuntaban a este fenómeno, aunque en la actualidad este mismo se está volviendo más intenso por causas del cambio climático. Ya que los centros urbanos carecen de árboles, la vegetación juega un papel crucial debido a la evapotranspiración” (Pomponi citado por BBC News Mundo, 2019).

Ciudades y países en desarrollo luchan con situaciones desafiantes por la invasión de asentamientos no planificados que limitan la inclusión de áreas verdes.

Según Meléndez (2022), las estaciones meteorológicas son comúnmente utilizadas para identificar las Islas de Calor Urbano (ICU), ya que registran datos sobre condiciones climáticas, como la temperatura. La información obtenida facilita la comprensión del comportamiento de las ICU y permite identificar las áreas más afectadas durante los periodos de mayor incremento de temperatura.

No obstante, aunque las estaciones meteorológicas aportan datos valiosos, también presentan ciertas limitaciones. Entre ellas se encuentran la falta de precisión, la ausencia de datos en tiempo real, errores en los registros y una cobertura insuficiente (Kukla et al., 1986; Karl et al., 1988, citados por Sarricolea y Martín, 2014).

A pesar de las limitaciones, la información proporcionada por las estaciones meteorológicas ha sido crucial en los estudios iniciales sobre las Islas de Calor Urbanas (ICU). En años recientes, varios autores han utilizado estas estaciones para investigar las ICU en diferentes contextos.

Dávila, Morales y Antonio (2011) identificaron las ICU de verano e invierno en Toluca, mapeando su distribución espacial. Casillas-Higuera et al. (2014) analizaron, compararon y validaron el modelado dinámico para estimar las ICU en Mexicali. Mercado y Marincic (2017) demostraron la existencia y morfología de las ICU en la mancha urbana de Hermosillo utilizando temperaturas superficiales.

Zavaleta-Palacios et al. (2020) explicaron las ICU en el estado de Chiapas a través del modelo meteorológico MM5, mientras que Araiza-Olivares (2022) estudió el comportamiento de las ICU en la Ciudad de México durante un periodo de 60 años.

Además del uso de estaciones meteorológicas, se han empleado otras herramientas para el estudio de las Islas de Calor Urbanas (ICU), siendo la teledetección una de las más destacadas, ya que amplía las opciones para los estudios climatológicos. En este sentido, el análisis de las ICU ha avanzado significativamente gracias al uso de imágenes satelitales, como las proporcionadas por Landsat.

Manzanilla-Quiñones (2023), por ejemplo, utilizó imágenes satelitales para identificar la isla de calor en Michoacán. Por su parte, Soto, Garzón y Jiménez (2020) caracterizaron las ICU en Armenia, Colombia, y detectaron su relación con la pérdida de vegetación. Thapa (2021) empleó imágenes de Landsat 8 para estudiar las ICU entre 2014 y 2019 en los periodos de verano e invierno en Katmandú y Bhaktapur. Asimismo, Mamani, Soto y Ruelas (2022) identificaron las ICU mediante mapas de temperatura basados en imágenes del sensor TIRS.

Frąckiewiczzen (2023) señala que el uso de imágenes satelitales facilita la recolección de datos en grandes áreas, y dado que la mayoría de estos satélites han estado operando desde los años 2000, es más fácil comprender fenómenos como las ICU. En general, el uso de imágenes satelitales de alta resolución prueban ser una herramienta útil para la detección de las ICU, la variedad de técnicas que brinda es amplia y el usuario puede darle cualquier finalidad.

La identificación y comprensión de las ICU permite formular propuestas para mitigar no solo problemas urbanos, sino también de salud y energía. En el presente estudio, se analizaron las ICU en la zona urbana del municipio de Toluca, Estado de México, utilizando imágenes satelitales Landsat 8 para el periodo 2018 y 2022. El objetivo fue localizar las áreas con mayor concentración de calor, lo que contribuirá a que las autoridades y organismos competentes tomen decisiones informadas para escenarios futuros.

1.3. PROBLEMÁTICA

Las ICU son un fenómeno causado por la concentración de edificaciones, calles pavimentadas, medios de transporte y otros servicios que demanda una población creciente. Toluca, capital del Estado de México, es un municipio caracterizado por su desarrollo industrial, lo que la hace susceptible a este fenómeno.

Los principales factores que contribuyen a la formación de una isla de calor urbana en Toluca son el aumento de la urbanización y la expansión de la infraestructura. Entre estos

factores se encuentran también la reducción de áreas verdes y espacios abiertos, la presencia de edificios altos que retienen el calor, la impermeabilización del suelo y la acumulación de calor en los materiales de construcción.

Estas condiciones elevan las temperaturas en las ciudades, creando un microclima más cálido en comparación con las áreas rurales.

Con el continuo crecimiento urbano, es probable que los problemas asociados con las islas de calor se agraven en Toluca, en parte debido al aumento de la demanda energética propia de una "sociedad moderna".

En resumen, la combinación de factores geográficos, urbanísticos y ambientales hace que Toluca sea propensa a desarrollar una isla de calor urbana, lo cual puede tener efectos negativos en la salud, el bienestar de la población, el medio ambiente y la calidad de vida en la ciudad.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Los patrones térmicos observados en áreas altamente urbanizadas son conocidos como "Islas de Calor". Según el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2020) al menos el 87% de la población del Estado de México vive en zonas urbanas, lo que hace que el exceso de viviendas y la escasez de áreas verdes incrementen este fenómeno.

La realización de estudios sobre este tema resulta relevante, ya que permiten analizar problemáticas de tipo ambiental, social y económico, estableciendo relaciones de causalidad entre los factores que contribuyen a este desafío.

Aunque aún es un tema poco investigado, existen trabajos que evalúan las islas de calor mediante diversas técnicas. Algunos estudios emplean estaciones meteorológicas, lo que permite una mayor precisión al identificar áreas críticas, mientras que los avances tecnológicos han ampliado las herramientas disponibles, proporcionando imágenes satelitales que cubren extensiones más grandes.

Gracias a las bandas espectrales de las imágenes satelitales, es posible obtener en menos tiempo información esencial, como la temperatura, un dato clave para identificar las islas de calor. Además, el proceso de análisis es más automatizado, lo que mejora la eficiencia en la recolección de datos.

Esta información es de gran valor para la toma de decisiones en cuanto a la planificación de la expansión urbana. Profundizar en este tema contribuiría a una mejor toma de decisiones en el futuro, evitando que los cambios drásticos afecten negativamente la vida cotidiana.

1.5. HIPÓTESIS

Toluca, debido a su ubicación rodeada de montañas, enfrenta dificultades para la circulación del aire, lo que limita la dispersión del calor. Esta situación, junto con la abundancia de edificaciones y grandes áreas pavimentadas que absorben y retienen el calor, la escasez de vegetación, la construcción de asentamientos irregulares y las actividades humanas, convierte a la ciudad en un lugar propenso al desarrollo de Islas de Calor Urbano. Como resultado, Toluca experimenta temperaturas elevadas, lo que incrementa el riesgo de enfermedades relacionadas con el calor, aumenta los costos de energía y eleva el consumo de agua destinado a mitigar los efectos del calor.

1.6. OBJETIVOS GENERALES Y PARTICULARES

1.6.1 OBJETIVO GENERAL:

- Analizar el fenómeno de islas de calor urbano (ICU) en la zona urbana de Toluca, identificando los factores que contribuyen a su formación y evaluando el impacto en el ambiente, la salud y la calidad de vida de sus habitantes.

1.6.2 OBJETIVOS PARTICULARES:

- Evaluar la relación entre el crecimiento urbano y el aumento de temperatura en zonas urbanizadas en Toluca.

- Conocer las técnicas y tecnologías disponibles, como imágenes satelitales y estaciones meteorológicas, para la identificación y monitoreo de islas de calor en la ciudad.
- Modelar, graficar y representar cartográficamente las Islas de Calor Urbano en la zona urbana de Toluca.
- Proponer recomendaciones para mejorar la planificación urbana y mitigar los efectos de las islas de calor urbano en Toluca, promoviendo el desarrollo de áreas verdes y espacios abiertos.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. ORIGEN

“El efecto Isla de Calor Urbano conocido como ICU se refiere a una diferencia de temperatura entre una ciudad y sus alrededores, el término surge por Luke Howard en 1817 al comparar las temperaturas en varios puntos de la ciudad de Londres (su ciudad natal), afirmó que en el centro de esta ciudad se percibían temperaturas más altas en relación con los campos de las afueras y señaló que existía una diferencia positiva en la temperatura nocturna de 2.2°C mientras que en el día era mucho menor. Con los estudios que realizó propuso que las zonas urbanas debían estructurarse de tal manera que las trazas quedaran separadas, esta propuesta no se refería a limitar el crecimiento de las zonas urbanas, sino garantizar un espacio libre (Wingen, 2023).”

Existen 2 tipos de Islas de Calor Urbano que se diferencian por su ubicación y características; la primera es la Isla de Calor Superficial (SUHI) descrita por Howard, que refiere al calor retenido en las superficies urbanas formadas por materiales como el asfalto y el hormigón (calles, techos y pavimentos).

Este tipo de ICU es más evidente durante el día ocasionando el aumento de la temperatura y son detectadas comúnmente con imágenes satelitales ya que a través de estas es posible medir la temperatura de la superficie.

Por otro lado, las Islas de Calor Atmosféricas (AUHI) refiere al aumento de la temperatura del aire en las áreas urbanas en comparación con las zonas rurales cercanas. Este tipo de ICU es más pronunciado durante la noche debido a que las superficies urbanas que

almacenan calor durante el día lo liberan lentamente (Oke, Voogt, 2003 citado por IA, 2024)

A pesar de que el origen de las islas de calor fue mencionado por primera vez por Howard, el término "isla de calor" fue acuñado hasta la década de 1950 por el climatólogo estadounidense Gordon Manley. Desde entonces, varios científicos y estudios han contribuido a la comprensión de las islas de calor y su origen.

2.2. CONCEPTUALIZACIÓN

Cuando hablamos de Geografía nos referimos a la ciencia que estudia las relaciones sociedad-naturaleza con su fundamento espacial, establecida por aquellas teorías de localización y distribución de los hechos que conforman la superficie terrestre (COMECOSO, 2024.)

También contribuye al cuidado de áreas naturales protegidas, analiza el territorio para su planificación sustentable y ayuda al entendimiento de las necesidades humanas y la vida en la tierra.

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI Cuéntame, 2024) describe a la Geografía como la ciencia que estudia y describe el entorno que nos rodea, basándose en análisis de los elementos físicos, sociales y económicos que coinciden en un lugar y tiempo determinado. Estos 3 elementos están en constante interacción y transformación que si se observa en conjunto se puede analizar, comprender e interpretar la realidad del espacio geográfico.

Ya que la Geografía se ha considerado una ciencia, presenta una diversidad de formas para su análisis, estudio, descripción e interpretación, para un mejor entendimiento describe 3 de sus ramas principales.

“Geografía Física: está centrada en el análisis y comprensión de las características, desarrollo y procesos del medio físico como la geomorfología, climatología, hidrología y biogeografía. **Geografía Biológica:** se encarga de estudiar la localización de los seres vivos (plantas y animales) a lo largo del territorio. **Geografía Humana:** analiza y relaciona al ser humano con el medio

físico terrestre. Estudia su distribución, evolución, la influencia que ha tenido en el entorno y los efectos que derivan de ello tanto a nivel social, político como económico (Unir,2024).”

Naturalmente la geografía es importante en la formación de las islas de calor, su influencia radica en la capacidad de analizar las relaciones entre el entorno físico, el clima y la actividad humana permitiendo mapear y estudiar la distribución espacial de este fenómeno. La geografía ayuda a comprender las causas y consecuencias de las islas de calor urbano de manera que se desarrollen estrategias de mitigación que promuevan en un entorno urbano más saludable. Aunque la geografía es una ciencia amplia necesita de factores específicos para estudiar este tipo de fenómenos.

La influencia del clima local también es participe de este fenómeno, de acuerdo con Escardó (2010) el término **Clima** es definido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) como “el conjunto fluctuante de condiciones atmosféricas caracterizado por los estados y la evolución del tiempo, en el curso de un periodo suficientemente largo y en un dominio espacial determinado”.

La OMM ha definido esta palabra en más de una ocasión, por ejemplo, en la Conferencia de Varsovia (1935) definió el clima como las condiciones meteorológicas medias para mes y año, calculadas en 30 años. El clima es el resultado de la actuación de la radiación solar, la atmósfera, la forma y movimiento de la tierra y sobre todo de las características de la superficie terrestre (Rodríguez y León, 2012).

Por otro lado, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) define “clima” como la síntesis de las condiciones meteorológicas en un lugar determinado, caracterizada por estadísticas a largo plazo (valores medios, varianzas, probabilidades de valores extremos, etc.) de los elementos meteorológicos en dicho lugar.

Aun cuando la geografía toma un papel importante en la formación de las islas de calor, el clima es una de las variables principales por las cuales se crea este fenómeno ya que

a través de este, las condiciones atmosféricas como circulación del aire, humedad y radiación determinan si hay aumento o disminución de temperatura.

La temperatura sin duda es la causa principal en la formación de una isla de calor, su relación directa se debe a factores como la actividad humana, la concentración de edificios y materiales de construcción que absorben y retienen calor.

Inzunza (2006) considera que:

*“el concepto de **Temperatura** se deriva de la idea de medir el grado de caliente o frío relativo y de la observación de que las variaciones de calor sobre un cuerpo producen una variación de su temperatura, mientras no se produzca la fusión o ebullición.*

Aunque la palabra temperatura y calor se han utilizado como sinónimos representan significados diferentes; la temperatura es una propiedad de un cuerpo y el calor es un flujo de energía producido por las diferencias de temperatura. La palabra “temperatura” ha sido utilizado en diferentes áreas como química y física, sin embargo, en Geografía refiere a un elemento que determina el clima en un lugar y temporada determinada, cuantifica la cantidad de energía calorífica que se encuentra en el aire en ese lugar.

Cuando hablamos de islas de calor, referimos a aquellas áreas más cálidas en comparación a zonas circundantes por absorción o liberación de calor, llamamos Calor a la energía térmica intercambiada entre dos o más cuerpos por tener distinta temperatura.

La Nueva Escuela Mexicana (2022) nos dice que

“el concepto Calor se estudió primeramente por el químico francés Antoine Lauren de Lavoisier en el año 1789, en su libro "Tratado Elemental de la Química" menciona que el calor era producto de un fluido elástico al que llamo "calórico". Se sabe que el calor es la energía transmitida entre 2 o más cuerpos, además de ser una forma en la que procesos naturales ocurren como la formación de rocas e incluso corrientes marinas. El calor en forma de energía permite la realización de diversas actividades y resulta útil para el funcionamiento de algunas maquinas como el transporte.”

De acuerdo con Pérez y Gardey (2023) la *Altitud* es la distancia vertical que existe entre un punto a la tierra y el nivel del mar, es utilizado como sinónimo de altura en referencia a una distancia respecto a la tierra, región o a una cierta elevación sobre la superficie.

La geografía altitudinal refiere a los pisos térmicos en los países intertropicales con características como la temperatura media, la insolación y las precipitaciones. La medición de la altitud es importante para disciplinas como la geografía, la meteorología, la aeronáutica e incluso en ramas como la arquitectura.

Según lo anterior, a medida que la altitud aumenta las temperaturas disminuye y, por ende, se mitiga la presencia de islas de calor; si la altitud es baja aquellas áreas urbanas que se encuentren en valles se expondrán por la falta de circulación de aire provocando una isla de calor.

Ahora bien, la meteorología también es otra de las ciencias que influye en las islas de calor y se ha descrito de diferentes formas, de acuerdo con el Centro Regional del Clima para el Oeste de Sudamérica (CRCOSA) la **Meteorología** es la ciencia responsable de estudiar las condiciones del tiempo, del clima y del cambio climático en el planeta, es una ciencia multidisciplinaria que comprende fenómenos físicos, químicos y geográficos.

A diferencia de la CRCOSA, el Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) de Panamá define la "Meteorología" como la ciencia interdisciplinaria que estudia el estado del tiempo, el medio atmosférico, los fenómenos allí producidos y las leyes que lo rigen. Se refiere al estudio de los fenómenos atmosféricos y de los mecanismos que producen el tiempo orientado a su predicción.

Y por otro lado National Geographic (2011) describe que

"la "Meteorología" está asociada a las condiciones de la atmósfera en un tiempo y lugar específico con relación a la temperatura, precipitaciones y otros factores como las nubes y se genera a través de varias fuerzas algunas visibles y otras no visibles.

Conforme a lo anterior la meteorología es capaz de analizar patrones que afecten el comportamiento de las islas de calor, un claro ejemplo es la circulación de los vientos los cuales afectan la distribución del fenómeno ya que si hay disminución

de vientos el calor queda atrapado, por el contrario, si hay una tormenta puede enfriar temporalmente la isla de calor y mitigar el impacto en las ciudades.”

Por consiguiente, en una ciudad se desarrolla una isla de calor por factores como edificios, transporte, industria entre otras, entonces una **Ciudad** se define como un área en donde se asienta una población con una alta densidad de habitantes, se caracteriza por aspectos físicos particulares que definen el paisaje como edificios, puentes, autopistas, transporte público y por el acceso a servicios como luz, agua, drenaje entre otros.

Según el Instituto Geográfico Nacional (2020) una Ciudad se refiere a un núcleo de población de ciertas dimensiones, con un poblamiento muy concentrado y una alta densidad de edificaciones. Presenta funciones específicas y especializadas las cuales la convierten en un lugar central respecto al territorio circundante, además actúa como polo de atracción de personas y gracias a ello se desarrollan actividades económicas (no agrarias) como el comercio.

En las ciudades, las islas de calor tienen consecuencias negativas en el medio ambiente y en la calidad de vida de las personas, entre ellas el alto consumo de energía, contaminación del aire y eventos extremos como los "golpes de calor", pero se puede mitigar el problema incrementando áreas verdes en las zonas urbanas.

A partir de esto Sposob (2018) define una **Zona Urbana** como aquella en la que se encuentra una gran concentración de población y la infraestructura propia de una ciudad como calles, avenidas, edificios y comercios. A diferencia de las zonas rurales en donde predominan las actividades agrícolas y ganaderas, las actividades económicas se vinculan a los sectores secundarios y terciarios.

De acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) la **Contaminación** es la presencia que existe en el aire de pequeñas partículas o productos secundarios gaseosos que pueden implicar riesgo, daño o molestia para las personas, plantas y animales que se encuentran expuestas a dicho ambiente. Los

medios por los que se produce la contaminación se concentran en procesos industriales y fuentes móviles como automóviles.

Encinas (2011) menciona que la contaminación se refiere a la concentración de sustancias o formas de energía no deseables en el aire, agua o suelo que puedan afectar el confort, salud y bienestar de las personas y al uso y disfrute de lo que ha sido contaminado. Los contaminantes son emitidos por fuentes que son naturales o artificiales, estas últimas pueden ser estacionarias o fijas como las industrias o los automóviles en el tráfico.

National Geographic refiere que la contaminación no solo perjudica al medio ambiente, sino que representa costos económicos resultado del impacto en la salud humana, Pineda-Rojas nos dice que es importante entender cuáles son las fuentes de contaminación donde puede haber problemas y quienes se pueden encargar de resolverlos. Los tipos de contaminación que existen son:

- **Contaminación del Aire:** contaminación atmosférica y se produce cuando las concentraciones de especies químicas en el aire están en niveles que afectan la salud de las personas, la vegetación, los animales y el patrimonio cultural.
- **Contaminación del Agua:** Tiene su origen en más de 1 fuente, incluidos los desechos municipales, industriales, agrícolas, aguas residuales y la escorrentía de nutrientes y amenaza la seguridad alimentaria.
- **Contaminación del Suelo:** Es causada por la presencia de sustancias químicas xenobióticas (ajenas al cuerpo humano), generalmente es provocada por la actividad industrial, productos químicos agrícolas o la eliminación inadecuada de desechos.

Como se dijo al inicio, la contaminación actúa de manera recíproca con las islas de calor, las actividades básicas de la población contribuyen a la contaminación del aire y afecta directamente a la salud y el bienestar de los residentes.

Molina indica que las áreas verdes al interior de las ciudades juegan un papel importante de descontaminación, ya que actúan como un filtro que absorbe y retiene la contaminación particulada que flota en el aire tales como el polvo, el humos y químicos.

De modo que las **Áreas Verdes** son espacios arbolados situados dentro del espacio urbano que permite mantener una buena calidad de vida para las personas y aumentar su bienestar y esta recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Dentro de estos espacios es posible realizar actividades de ocio y ejercicio físico.

Según Meza y Maya (2010), las áreas verdes o conocidas como vegetación urbana son espacios construidos para integrar al hombre con la naturaleza, compuestos por vegetación como pastos, árboles y arbustos.

El Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) describe al área verde como espacios abiertos, público o privado, cubiertos por vegetación, como parques, jardines, huertos, bosques dentro de una ciudad y que pueden tener uso directo o indirecto para los usuarios. Estas áreas se consideran los pulmones de las ciudades, que por medio de la vegetación purifican el aire.

De igual manera Candanedo y Villareal (2019) mencionan que la planificación de las ciudades incluye diseño de calles, orientación, ejes, altura de edificios, factor de vista entre otros, estas variables afectan la parte ambiental como el flujo de radiación solar, la dirección y velocidad de vientos.

Por lo antes mencionado las áreas verdes actúan como una barrera natural que filtra y retiene contaminantes evitando que llegue a ríos y que se erosione el suelo. Pese a purificar el aire, el agua y el suelo, las superficies construidas con materiales como el concreto y el asfalto infieren en la formación de islas de calor.

Así mismo los **Materiales de Construcción** suelen clasificarse por características termales, entre ellas están el calor específico, color, textura y porcentaje de albedo. Al seleccionar materiales que presenten colores oscuros y un albedo bajo colaboran a la retención de temperatura en el área y esto se debe a que los materiales absorben y

retiene calor y las zonas verdes absorben y transforman la luz sola en su proceso de fotosíntesis.

Blender (2015) menciona que las causas de una Isla de Calor Urbano refieren a la escasez de áreas verdes, pavimentos impermeables y el uso de automóviles, además del aumento de absorción de energía por superficies de baja reflectancia, por el calor acumulado debido a los materiales de construcción y por la obstrucción de movimientos de aire por medio de la edificación especialmente la falta de flujo de aire nocturno. Este tipo de efectos se presentan habitualmente en calles pavimentadas con mezclas asfálticas de tonos oscuros, en épocas más cálidas la temperatura suele incrementarse varios grados por encima de la ambiental.

Los materiales que absorben el calor durante el día y lo liberan durante la noche no solo contribuye al aumento de temperatura, sino también influye el color. Aquellos materiales con colores oscuros como el concreto negro absorben más calor a comparación de materiales con colores claros como los techos blancos ya que actúan como reflectantes y acumulan menos calor.

2.3. URBANIZACIÓN

Durán y Gálvez (2022) nos dicen que el proceso de urbanización que da lugar al clima urbano se expresa en términos de concentración de población, cambios en los materiales en la superficie terrestre y en la expansión de los espacios para habitar. Para evaluar el impacto de la urbanización en el clima regional existen 5 métodos principales:

- 1. Comparación de datos climatológicos entre estaciones urbanas,** suburbanas y rurales, bajo la misma influencia de los sistemas meteorológicos de meso escalas que son fenómenos que comprenden entre 2 y 20 km de extensión territorial con una duración temporal de horas.
- 2. Realización de recorridos con vehículos instrumentados** en trayectos previamente planeados para identificar procesos que ocurren dentro de los 200m en el espacio y que se manifiesta en minutos a pocas horas.

3. **Análisis de series de tiempo** para relacionar el crecimiento urbano con el clima en la ciudad en meso escala.
4. **Análisis de imágenes satelitales** en las bandas térmicas infrarrojas (IR), de igual forma es a meso escala.
5. **Implementación de modelos físicos o numéricos** para simular los fenómenos que ocurren dentro de las ciudades, generalmente en la microescala.

Para el análisis de las Islas de Calor Urbano, se utilizaron tanto estaciones meteorológicas móviles como fijas. Este método es ampliamente empleado en diversos estudios debido a su capacidad para proporcionar datos más precisos, permitiendo medir la temperatura en distintas zonas del área de estudio y, de este modo, identificar las ICU. Los datos se recopilan directamente en el campo, lo que facilita una mejor comparación del comportamiento térmico durante el día y la noche, gracias a los registros detallados obtenidos.

2.4. TÉCNICAS

La evolución en técnicas, tecnología y el fácil acceso a **imágenes satelitales** ha hecho de la teledetección una herramienta para estudios ambientales y se ha utilizado con frecuencia en estudios que hacen diagnósticos de las ICU.

A través de **modelos de simulación** podemos predecir temperaturas en diferentes sitios tomando en cuenta factores como la geometría de las edificaciones, densidad de población, vegetación entre otros de manera que facilite la identificación de las ICU.

2.4.1. IMAGEN TÉRMICA

Las **imágenes térmicas** son una herramienta fundamental en la identificación y análisis de las ICU, ya que permiten observar las variaciones térmicas en diferentes áreas de la ciudad.

Según Gago et al. (2013), los sensores infrarrojos instalados en satélites o drones captan la radiación térmica emitida por las superficies urbanas, que luego se convierte en una

imagen en la que se representan las temperaturas mediante distintos colores. Esta técnica facilita la detección de las zonas más cálidas, que corresponden a las ICU, y ofrece un análisis tanto espacial como temporal de los patrones térmicos.

Las **ICU** se identifican en las imágenes térmicas por la mayor emisión de calor que proviene de superficies como el asfalto y los edificios, en comparación con las áreas naturales circundantes (Santamouris, 2020).

Además, este tipo de imágenes es útil para la planificación urbana, ayudando a tomar decisiones sobre mitigación mediante la instalación de áreas verdes o el uso de materiales que reflejan la radiación solar (Voogt y Oke, 2003).

Normalmente las imágenes térmicas muestran las temperaturas frías en tonos azules, violetas o verdes, mientras que las temperaturas más cálidas se representan en colores rojos, naranjas y amarillos. Estas cámaras térmicas detectan la temperatura cuando hay diferentes niveles de luz infrarroja en los objetos (no son visibles a la vista humana), cuando el objeto es más caliente más radiación produce y esta se convierte en imagen.

Las imágenes térmicas permitirán identificar aquellas áreas con mayor retención de calor, lo que ayuda a comprender mejor las características, formación y comportamiento de las islas de calor, y analizar cómo afectan y pueden mitigarse.

2.4.2. SENSORES REMOTOS

Los sensores remotos juegan un papel crucial en la identificación y análisis de las ICU, ya que permiten recolectar datos sobre la superficie terrestre y su temperatura sin necesidad de contacto directo. A través de satélites o drones, los sensores remotos proporcionan una visión amplia y detallada de las áreas urbanas afectadas por el fenómeno, facilitando su monitoreo y estudio. A continuación, se explican algunas de las principales funciones de los sensores remotos en este contexto:

2.4.2.1. Monitoreo de temperaturas superficiales

Los sensores remotos detectan la **radiación térmica** emitida por las superficies terrestres, lo que permite medir las temperaturas en áreas urbanas. Al capturar imágenes térmicas de gran extensión, los investigadores pueden identificar zonas donde las temperaturas son significativamente más altas, que corresponden a las Islas de Calor Urbanas (Gago et al., 2013).

2.4.2.2. Cobertura a gran escala

Una de las principales ventajas de los sensores remotos es su capacidad para monitorear amplias áreas en un solo barrido. Esto permite obtener una **visión global** del fenómeno de las ICU, detectando patrones térmicos en grandes ciudades y áreas metropolitanas, algo difícil de lograr con métodos de medición en tierra, como las estaciones meteorológicas (Voogt y Oke, 2003).

2.4.2.3 Análisis temporal

Los sensores remotos pueden realizar un monitoreo **constante y en diferentes momentos** del día y del año, lo que permite a los investigadores analizar la variación de las temperaturas urbanas a lo largo del tiempo. Esto es importante para comprender cómo fluctúan las Islas de Calor durante el día (por ejemplo, entre el día y la noche) o entre estaciones (verano e invierno), proporcionando una visión más completa del comportamiento térmico urbano (Santamouris, 2020).

2.4.2.4. Identificación de zonas críticas

Mediante las imágenes capturadas por sensores remotos, se puede **delimitar** con precisión las zonas más afectadas por las Islas de Calor, identificando áreas donde se concentra el calor. Esto facilita la planificación de **estrategias de mitigación**, como la creación de más espacios verdes o la modificación de materiales de construcción para reducir la absorción de calor.

2.4.2.5. Proporcionar datos para modelado y simulación

Los datos obtenidos por los sensores remotos se utilizan para alimentar modelos computacionales que simulan el comportamiento térmico en las ciudades. Estos modelos ayudan a predecir cómo se comportarán las ICU en el futuro bajo diferentes escenarios de **cambio climático** o **crecimiento urbano**, lo que es esencial para planificar y gestionar mejor las ciudades (Chen et al., 2014).

2.4.2.6. Complemento a los métodos tradicionales

Aunque las estaciones meteorológicas proporcionan datos precisos en puntos específicos, los sensores remotos complementan esta información ofreciendo una **perspectiva integral** y en tiempo real del fenómeno. Al combinar ambos métodos, se obtiene un análisis más detallado y completo de las Islas de Calor Urbanas.

En resumen, los sensores remotos son esenciales para la identificación y estudio de las Islas de Calor Urbanas, ya que ofrecen datos detallados sobre la temperatura de la superficie urbana, permiten el monitoreo a gran escala, y facilitan la planificación de acciones para mitigar sus efectos.

2.5. TEORÍAS

Las ICU son fenómenos complejos que están influenciados por múltiples factores ambientales, urbanos y sociales. Varias teorías complementan su comprensión y análisis, proporcionando un marco más amplio para abordar los factores que contribuyen a la formación y evolución de las ICU. A continuación se presentan algunas de las principales teorías y conceptos que complementan el estudio de las Islas de Calor Urbanas:

2.5.1. TEORÍA DEL BALANCE DE ENERGÍA EN SUPERFICIES URBANAS

Esta teoría explica cómo se distribuye y transforma la energía en entornos urbanos, donde las superficies como el asfalto, el concreto y los edificios absorben más radiación solar que las áreas naturales. La energía solar se convierte en **calor sensible**, lo que contribuye al aumento de la temperatura en las ciudades. El **balance de energía** también involucra la emisión de radiación térmica por las superficies, la transferencia de calor

entre el aire y el suelo, y la evaporación. Esta teoría es fundamental para comprender cómo se generan las ICU (Oke, 1982).

2.5.2. TEORÍA DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO

El **cambio en el uso del suelo**, particularmente la conversión de áreas rurales o naturales en zonas urbanas es un factor clave en la creación de Islas de Calor Urbanas. Esta teoría se centra en cómo la urbanización y la pérdida de vegetación modifican el clima local. Las áreas verdes, que tienen una mayor capacidad para enfriar el ambiente a través de la evapotranspiración, son reemplazadas por materiales impermeables que contribuyen al calentamiento urbano (Stone, 2009).

2.5.3. EL EFECTO ALBEDO

Portillo (2023) describe:

“el efecto albedo como un fenómeno que refiere a la capacidad que tiene una superficie para reflejar la radiación solar, cuándo esta radiación llega a la superficie de la tierra parte de ella es absorbida y calienta el área donde llega mientras que la otra parte solo se refleja y regresa al espacio.

Las superficies más reflectantes tienen un alto albedo entre ellas las superficies claras como la nieve por su capacidad para reflejar luz solar, por el contrario, las menos reflectantes tienen un bajo albedo y en esta encontramos superficies oscuras como el asfalto y las áreas urbanas.

Las ciudades tienden a tener albedos más bajos por la presencia de techos oscuros, pavimentos de asfalto, concreto y edificios de vidrio. Por otro lado, las temperaturas más altas en las ciudades por superficies de bajo albedo aumentan los riesgos de golpes de calor, incrementa la demanda de energía para la refrigeración y afectan negativamente la salud de las personas.

El albedo relacionado con las Islas de Calor refiere a la capacidad de las áreas urbanas para absorber radiación solar debido a los materiales con los que están construidas, el asfalto y el concreto son los que mayoritizan este aumento de temperatura ocasionando problemas de salud y elevando la demanda energética.”

2.5.4. VEGETACIÓN URBANA

Bianconi y Uribe (2012) consideran que:

“la incorporación de vegetación al sistema urbano crea beneficios en 3 áreas donde se desenvuelve la actividad humana: la social, la ambiental y la económica. En la parte social se mejora la calidad de vida de los habitantes creando ambientes confortables para una buena convivencia, en la parte ambiental mejora la temperatura, disminuye el ruido, mejora la imagen urbana y es capaz de evitar riesgos como las inundaciones, por último, en la parte económica al mejorar esta calidad ambiental en las ciudades se genera un beneficio en sus habitantes al satisfacer sus necesidades por la reevaluación del suelo.

La urbanización trae consigo múltiples problemas entre ellas las islas de calor. La pavimentación evita la infiltración al subsuelo de agua de lluvia, la temperatura aumenta cuando atrapa los rayos del sol además de sumar el calor generado por actividades humanas como el uso de aparatos electrónicos. Las plantas ayudan a reducir los efectos climáticos negativos de la urbanización, así se contribuye a mejorar los climas urbanos, a una escala microclima y a una escala mayor, aminorando los efectos de islas de calor urbano.

Esta teoría sostiene que la falta de vegetación en las áreas urbanas contribuye a las islas de calor. Los árboles y las áreas verdes pueden proporcionar sombra, reducir la radiación solar directa y aumentar la evaporación, lo que ayuda a mantener temperaturas más bajas.”

2.6. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

De acuerdo con el Sistema Geológico Mexicano (2017) un Sistema de Información Geográfica es un conjunto de información con herramientas informáticas, es decir con programas informáticos o software. El objeto concreto de un sistema de información es la obtención de datos relacionados con el espacio físico, de esta manera se convierte en un sistema de información geográfica (SIG).

Entonces un SIG es un software que permite a los usuarios crear consultas interactivas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada y asociada a un territorio conectando mapas con base de datos. Estos sistemas facilitan la visualización de los datos obtenidos en un mapa para reflejar y relacionar fenómenos geográficos de cualquier tipo, desde mapas de carreteras hasta sistemas de identificación de parcelas agrícolas o de densidad de población.

El SIG funciona como una base de datos geográfica (datos alfanuméricos) asociada a objetos existentes en un mapa digital y dan respuesta a las consultas interactivas de los

usuarios analizando y relacionando diferentes tipos de información con una sola localización geográfica, de esta forma señalando un objeto se conocen sus atributos e inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

El sistema permite separar información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, de manera que se pueda trabajar de forma rápida y sencilla facilitando la relación de información existente para la obtención de resultados.

El campo de aplicación de los sistemas de información geográfica es muy amplio, se utiliza en cualquier actividad con un componente espacial, los campos más utilizados son:

- **Infraestructura:** ayuda a optimizar sistemas de mantenimiento como agua, gas, teléfono, alcantarilla entre otros o auxiliar en la planificación de redes entre otros usos.
- **Medio Ambiente:** evalúa el impacto ambiental en proyectos de reforestación, riego, agrícolas y ecosistemas.
- **Recursos Minerales:** analiza elementos puntuales y apoya a la interpretación de fallas y formación geológicas.
- **Cartografía:** interviene en la elaboración de cobertura de datos, clasificación de información sobre el terreno, sistemas de planificación urbana, arquitectura, municipios entre otros.
- **Información de rutas:** obtención de modelos de tráfico y vías, planificación de sistemas de transporte.
- **Geomarketing:** puede determinar áreas de alcance de clientes potenciales, análisis estratégico de mercados y otros usos.

2.6.1. ARCGIS

ArcGIS es un sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica, es también una plataforma líder para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG) de manera que personas de todo el mundo la utilizan para poner los conocimientos geográficos a disposición de sectores de gobierno, empresas, áreas de la ciencia, la educación y de cualquier usuario. ArcGIS se encuentra disponible en cualquier navegador web, dispositivos móviles y equipos de escritorio.

A medida que la tecnología evoluciona el funcionamiento de estos sistemas se amplía, la compatibilidad con plataformas de servidor y de la nube posibilitan colaboraciones y uso compartido de información que es vital para la planificación y la toma de decisiones.

En general los usuarios que utilizan este sistema les permite resolver problemas, mejorar la toma de decisiones, tener una mayor comprensión e incluso colaborar con otras disciplinas, sin embargo, las acciones que más se realizan son:

- **Creación y distribución de mapas inteligentes:** Los mapas que se crean en ArcGIS muestran información y a su vez permiten utilizarla para la consulta, el análisis, la planificación y la administración. Con este sistema los mapas no solo se crean para mostrar datos, también sirven como herramienta para buscar y comprender patrones para analizarlos y realizar modelados.
- **Compilar Información Geográfica:** ArcGIS permite sintetizar datos de diversas fuentes en una misma vista geográfica unificada, estas fuentes incluyen información de bases de datos geográficas, datos tabulares de sistemas de administración de bases de datos, archivos, hojas de cálculo, videos, fotos, datos KML, fuentes en directo de sensores, imágenes aéreas y de satélite.
- **Crear y administrar bases de datos geográficas:** Estas bases hacen que la información geográfica se almacene en un formato estructurado que simplifica la administración, la actualización, la reutilización y el uso compartido de datos. Puede diseñar, crear, mantener y utilizar las bases para usuario individual y empresa.

- **Resolver problemas con el análisis espacial:** El objetivo que persigue es derivar información de los datos existentes para permitir una mejor toma de decisiones mediante operaciones y herramientas analíticas que permiten resolver muchos problemas desde localizar entidades hasta modelar procesos naturales como el flujo de agua sobre el terreno.

2.6.2. QGIS

QGIS es un sistema de información geográfica profesional de fácil uso, gratis y de código abierto que hace posible la visualización, análisis, edición y publicación de información geoespacial. QGIS permite crear mapas, que pueden ensamblarse bajo diferentes formatos, como muchos otros sistemas de información geográfica existentes. Las ventajas de utilizar QGIS son:

-Es gratuito y de código abierto: Es un SIG con licencia pública general que permite utilizar QGIS libremente y para cualquier propósito, modifica el software (acceso al código fuente) y redistribuye copias para instalar QGIS en tantos ordenadores se requiera.

-Es multiplataforma: QGIS funciona en sistemas operativos entre ellos Linux, Windows, Mac y Android y se instala en una llave USB que permite transportar QGIS de un ordenador a otro.

-Utilidad: Hoy en día muchas instituciones utilizan QGIS, oficinas de estudio, universidades, consultorías, instituciones gubernamentales, empresas privadas, entes locales y regionales.

-Compatibilidad con diversos formatos: Uno de los puntos fuertes de QGIS es la interoperabilidad y te permite trabajar con una multitud de datos vectoriales y ráster, entre ellos tenemos formatos shapefile, MapInfo, KML y DAO.

Los SIG representan objetos del mundo real como carreteras, usos del suelo, altitudes entre otros, en función de representar el espacio hay 2 formas de almacenar los datos en un SIG: Ráster y Vectorial.

2.7. PERCEPCIÓN REMOTA

Según la Secretaría de Marina (2009), nuevas tecnologías como la percepción remota han contribuido a sustento estudios ambientales porque brinda herramientas como imágenes satelitales tomadas desde el espacio o de aviones equipados con sensores infrarrojos y para propósitos de las islas de calor se utilizan para detectar, cuantificar y monitorear el fenómeno.

La percepción remota es una técnica que evoluciona de manera acelerada en las últimas décadas, sus orígenes se ubican con el inicio de actividades aeronáuticas a principios del siglo XX y posteriormente se desarrolla con actividades espaciales. La percepción remota tiene parámetros que la comunidad científica le ha designado, entre ellas tenemos:

-Los sistemas de percepción remota: Constan de 3 elementos principales que son 1 fuente de iluminación, un sensor y el objeto observado.

-Las fotografías aéreas: Fueron durante muchos años uno de los productos más utilizados, funcionando como insumo principal para la elaboración cartográfica base de nuestro país. Sin embargo, con la exploración de recursos naturales y el desarrollo de equipos de cómputo las imágenes se convirtieron en una de las opciones más adecuadas para trabajar grandes áreas. Estas imágenes proporcionan mayor detalle espacial.

-Los satélites: Son diversos en sus funciones como la resolución espacial, el número de regiones espectrales o bandas, periodicidad con la que se obtienen las escenas entre otros. Uno de los sensores más conocidos es el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) con imágenes que abarcan un país diariamente y el Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) que es ideal para el monitoreo en gran escala de la biosfera y por otro lado la serie Landsat y SPOT son adecuados para trabajos con mayor detalle.

La utilidad de la percepción remota consiste en estudiar y analizar los fenómenos naturales y ambientales desde una distancia a través del uso de sensores como bien se menciona y dispositivos de recolección de datos.

Para las islas de calor, la percepción remota se utiliza para identificar y mapear la distribución y magnitud de temperaturas altas en las áreas urbanas mediante imágenes térmicas tomadas desde el espacio o de aviones con sensores infrarrojos.

La percepción remota ayuda a comprender las características del entorno urbano, respondiendo a cómo se forman las islas de calor mediante la altura, la densidad, las edificaciones, la vegetación y otros que influyen en la temperatura de una zona urbana.

2.7.1. TELEDETECCIÓN

Los primeros conocimientos sobre la historia de la teledetección son sobre el primer globo en 1859 usado para captar fotografías aéreas de la tierra, se pretendía que fotografiara el bosque de Boulogne y el Arco del Triunfo, por lo que se concluyó que podía aplicarse para trabajos sobre levantamientos topográficos y catastrales.

Sin embargo, hasta 100 años después la NASA colocó su primer satélite en órbita, era el TIROS-1 capaz de enviar una imagen de la tierra cada 6 horas revolucionando la investigación meteorológica. A partir del 2009 el satélite SMOS órbita alrededor de nuestro planeta, midiendo la salinidad de los océanos y la humedad del suelo.

De acuerdo con Alonso (s.f) teledetección espacial es aquella que permite obtener información sobre objetos o fenómenos del sistema terrestre a partir de imágenes adquiridas a distancia, a través de mediciones de energía electromagnética que se refleja o emite por objetos o fenómenos de interés. Esta disciplina aporta una serie de técnicas para la localización y recogida de datos de objetos y fenómenos a distancia.

Por ser tecnología reciente, la teledetección tiene múltiples aplicaciones ya que constantemente está en desarrollo, las áreas que utilizan información de los satélites en el espacio son: geografía, biología, edafología, geología, agronomía, oceanografía, cartografía y arqueología.

Con la teledetección se adquieren datos de la superficie terrestre, la interacción electromagnética entre el terreno y el sensor genera datos que se procesan después para obtener información interpretable de la tierra.

Las empresas y organismos públicos incorporan el uso sistemático de imágenes en sus proyectos porque destacan la extracción de información como detección de cambios, agricultura, vulcanología y monitorización de desastres naturales.

El uso masivo de imágenes de teledetección comenzó en el año 2008 con la disposición de imágenes Landsat bajo licencia libre y abierta, pero no fue hasta 2014 la democratización de la teledetección llegó con el lanzamiento del satélite radar Sentinel 1A en 2014 y el satélite óptico Sentinel 2A en 2015, pertenecientes ambos al programa Copérnicus de la Comisión Europea (anteriormente conocido como GMES) (Ibáñez, s. f).

2.7.2. SISTEMAS DE TELEDETECCIÓN

Los sistemas de la teledetección se dividen en 2 partes, los activos y los pasivos:

Teledetectores Activos: Son encargados de emitir la energía necesaria para escanear objetos de estudio, además de medir la radiación reflejada en el objeto. Un ejemplo de estos son los radares de tráfico.

Teledetectores Pasivos: Se encargan de detectar la radiación que emite o refleja el objeto de estudio como el sol. Los teledetectores más conocidos son los infrarrojos.

Los sistemas de teledetección tienen los mismos componentes capaces de llevar a cabo tareas de observación y medición, entre ellos tenemos:

Sensor: Pieza, generalmente con cámara, con la cual se capta, codifica y transmite las imágenes o los datos del objeto de estudio.

Centro de recepción: La información se recibe en el centro de recepción que puede estar situado a muchos kilómetros del sensor. Aquí se decodifica, se procesa y se corrige.

Canal de distribución: Una vez la información está perfectamente procesada y corregida se puede llevar a su canal de distribución para que sea compartida y que sean los expertos o los usuarios, depende del tipo información, los que le den una interpretación y conclusión (Ingeoexpert,2018).

2.7.3. TELEDETECCIÓN SATELITAL

La llegada de los satélites da paso a nuevas posibilidades al mundo de la teledetección, permitió observar objetos desde mayor altura y lejanía además de dar un paso importante hacia los sistemas de detección de cambios meteorológicos y hasta el conocimiento de nuestro propio planeta. La teledetección satelital como su nombre lo dice se lleva a cabo con satélites habitualmente meteorológicos, su sistema es pasivo porque se sirve de la radiación emitida por los objetos de su estudio para recoger datos.

Este tipo de teledetección se ha venido utilizando desde hace décadas para observar distintos procesos, aunque con la evolución de la tecnología la teledetección con drones está abriendo paso. Este nuevo sistema posee una mayor precisión y una imagen más detallada gracias a la resolución de la cámara, sin embargo, solo puede emplearse en zonas que no requieran una imagen panorámica o a mucha distancia como las zonas de cultivo (Ingeoexpert, 2018).

A medida que avanza la tecnología, los satélites ofrecen cada vez más una fuente confiable de información distribuida espacialmente sobre una variedad de variables ambientales. Al utilizar las propiedades reflectantes de la superficie y la atmósfera de la tierra, es posible controlar (entre otros) la cobertura vegetal, la lluvia, la capa de nieve, la temperatura de la superficie terrestre y la evapotranspiración real a través del tiempo.

Los sensores como Landsat ETM, MODIS, PROBA-V y Sentinel ofrecen una gama de opciones en diferentes escalas espaciales y temporales. Los satélites ahora proporcionan un archivo de imágenes que cubre varias décadas. Estos registros históricos nos permiten identificar tendencias y patrones espaciales en diferentes factores asociados

con la gestión de los recursos hídricos, como el suministro de agua, el consumo de agua y el crecimiento de los cultivos.

Los cambios en la cubierta de la tierra, como la deforestación y la expansión agrícola, pueden mapearse y cuantificarse en evaluaciones de los servicios del ecosistema y la degradación de la tierra. Mediante el uso de herramientas de última generación como Google Earth Engine, analizamos estas tendencias y patrones para ayudar a los responsables políticos a identificar medidas apropiadas en diferentes ubicaciones en su área de interés.

2.8. VARIABLES DE LAS ISLAS DE CALOR

La Radiancia Espectral (TOA) es aquella que mide la energía radiada por unidad de superficie, longitud de onda y ángulo sólido permitiendo evaluar la emisión de luz en una luminaria. En otras palabras, mide la cantidad de energía que una fuente de luz emite en diferentes longitudes de onda en un espacio determinado.

La Temperatura de Brillo (TB) es también conocida como Temperatura de Radiación, con frecuencia se utiliza para mediciones de infrarrojos térmicos provenientes de sensores tanto remotos como terrestres. Cuando la radiación es emitida por una superficie es igual a la de un cuerpo negro, esta temperatura se define como la Temperatura de brillo de la Superficie. A pesar de que la TB tiene dimensiones de temperatura no carece del significado de temperatura. Sin embargo, la TB puede utilizarse para estimar la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) siempre y cuando haya una única longitud de onda o canal infrarrojo térmico (Johnson, 2018).

La emisividad (E) es una propiedad de la superficie que determina la cantidad de radiación que emite un objeto a una temperatura determinada en comparación con un cuerpo negro a la misma temperatura. Esta misma es una fuente principal de errores en la medición de la temperatura infrarroja, en otras palabras la emisividad es una propiedad que indica la eficacia con la cual la superficie de un objeto emite radiación térmica. Sin embargo no todos los objetos tienen la misma eficacia, algunos factores que influyen en

la capacidad de emisión de un objeto son: el material, la textura superficial, ángulo de visión, geometría, longitud de onda y temperatura (está a pesar de tener gran importancia en la lectura de una cámara termográfica hay ocasiones en las que la imagen del objeto no revela la temperatura de este (Kapter, 2019).

El Índice de Vegetación es uno de los factores más importantes cuando hablamos de un análisis de islas de calor, constituye uno de los componentes del medio físico principales para el equilibrio del medio ambiente. La cubierta vegetal toma un papel importante y decisivo ya que de este depende el mantenimiento de recursos como la fauna, suelos y paisaje. Este índice de vegetación refiere a combinaciones de bandas espectrales que se registran mediante satélites de teledetección, en donde su función es realzar la cubierta vegetal en función de su respuesta espectral. El cálculo de este índice permite obtener una imagen donde se destaca de mejor manera variables como la densidad, índice de área foliar, cambios de cobertura vegetal entre otros (Alonso, 2023).

León (2017) menciona que

“el término de temperatura superficial terrestre se utiliza ampliamente por diferentes comunidades de investigación, entre ellas el clima, modelos numéricos o estudios de capa límite, esta temperatura se puede obtener de las mediciones de satélite y comparar con otras temperaturas. Cuando la temperatura de la superficie terrestre (LST) es medida con tecnologías de teledetección (sensores a bordo de aviones o plataformas satelitales) se trata de temperatura radiométrica. La teledetección de LST es basada en energía radiactiva total emitida por el suelo, se determina a partir de mediciones satelitales de emisiones en longitudes de ondas infrarrojas o de microondas. Cuando hay mediciones en los infrarrojos térmicos (TIR) estas son sensibles a la contaminación de las nubes, la necesidad de detectarlas limita el muestreo espacial y temporal.”

Como se ha mencionado la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) es utilizada en diversas áreas de investigación, la evolución de la tecnología permite ya el uso de satélites y sensores para determinar esta variable (tabla 2.1).

Tabla 2.1. Sensores y Satélites utilizados para el cálculo de LST (2024)

Satélite	Características
Landsat 7 y 8	<p>Propósito: Programa de observación terrestre de larga duración, operado por la NASA y el USGS.</p> <p>Resolución espacial: 30 metros en la mayoría de sus bandas espectrales, y 100 metros en la banda térmica de Landsat 7 (60 metros reescalados). Landsat 8 tiene una resolución térmica de 100 metros.</p> <p>Resolución temporal: 16 días (visita la misma área cada 16 días).</p> <p>Bandas relevantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bandas térmicas (10 y 11 en Landsat 8): útiles para detectar la temperatura de la superficie. • Bandas visibles y de infrarrojo cercano: permiten clasificar la vegetación y las áreas urbanas.
MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)	<p>Propósito: Sensor abordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA, diseñado para monitorear cambios a gran escala en la biosfera terrestre.</p> <p>Resolución espacial: 250 a 1000 metros, dependiendo de la banda.</p> <p>Resolución temporal: Dos imágenes al día (una diurna y una nocturna).</p> <p>Bandas relevantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bandas térmicas: capturan temperaturas de la superficie a escala global. • Bandas visibles e infrarrojo: útiles para monitorear la vegetación y el uso del suelo. <p>Aplicaciones en islas de calor: Ideal para análisis de gran escala y monitoreo continuo, permitiendo identificar patrones de temperatura y cambios de largo plazo.</p>
Sentinel-2 (Sentinel-2A y Sentinel-2B)	<p>Propósito: Parte del programa Copérnico de la Agencia Espacial Europea (ESA), diseñado para monitoreo ambiental.</p> <p>Resolución espacial: Hasta 10 metros en las bandas visibles y del infrarrojo cercano.</p> <p>Resolución temporal: 5 días (ambos satélites combinados).</p> <p>Bandas relevantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Infrarrojo cercano y SWIR (Infrarrojo de Onda Corta): útiles para la clasificación de áreas verdes y superficies impermeables. <p>Aplicaciones en islas de calor: Aunque no tiene banda térmica, es usado en combinación con otros satélites (como Landsat) para analizar la vegetación y las superficies urbanas, que contribuyen a las islas de calor.</p>
ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)	<p>Propósito: Sensor a bordo del satélite Terra de la NASA, diseñado para observaciones detalladas de la superficie terrestre.</p> <p>Resolución espacial: 90 metros para las bandas térmicas y 15 a 30 metros para las bandas visibles y de infrarrojo cercano.</p> <p>Resolución temporal: Revisita de 16 días, aunque la disponibilidad depende de programación específica de observación.</p> <p>Bandas relevantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bandas térmicas (5 bandas en total): permiten obtener información detallada de temperatura de la superficie. <p>Aplicaciones en islas de calor: Se utiliza en estudios que requieren datos térmicos de alta precisión y ha sido fundamental en el análisis de ICU a escala urbana.</p>
VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)	<p>Propósito: Sensor a bordo de los satélites Suomi NPP y NOAA-20, utilizado para monitoreo ambiental y meteorológico.</p> <p>Resolución espacial: 375 metros para algunas bandas térmicas y 750 metros para otras.</p> <p>Resolución temporal: Cobertura diaria (una imagen diurna y otra nocturna).</p> <p>Bandas relevantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bandas térmicas: capturan la temperatura de la superficie terrestre. <p>Aplicaciones en islas de calor: Ofrece datos diarios útiles para observar variaciones térmicas y patrones de ICU.</p>
GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite)	<p>Propósito: Serie de satélites geoestacionarios operados por NOAA para el monitoreo meteorológico en tiempo real.</p> <p>Resolución espacial: Entre 500 metros y 1 kilómetro para las bandas térmicas.</p> <p>Resolución temporal: Imágenes cada 5 a 15 minutos, según la región.</p> <p>Bandas relevantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bandas térmicas e infrarrojas: útiles para monitoreo continuo de la temperatura en áreas extensas. <p>Aplicaciones en islas de calor: Por su alta frecuencia de imágenes, es útil para estudios que requieran monitoreo en tiempo real de temperaturas extremas.</p>

Fuente: McCartney y Mehta (2020).

2.9. DIAGRAMA DE INVESTIGACIÓN SOBRE ISLAS DE CALOR

La figura 2.1 muestra en el diagrama los elementos del proceso de investigación, de manera que se facilite la comprensión del estudio en forma esquemática, cómo se relacionan los conceptos, etapas y variables.



Figura 2.1. Diagrama con los elementos del proceso.

Elaborado por Velázquez (2024)

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

Las islas de calor urbano como se ha mencionado, es un fenómeno que refiere al aumento de temperatura en áreas urbanas en comparación a zonas circundantes, tiene efectos negativos en la población tanto de salud como ambientales. Una de las metodologías más utilizadas para identificar y analizar las islas de calor es por teledetección, consiste en reunir información a distancia mediante sensores remotos como los satélites, aviones no tripulados o cámaras terrestres. Estos sensores obtienen datos sobre la temperatura de las superficies tanto urbanas como rurales, gracias a esto se comparan y evalúan sus diferencias abarcando áreas extensas y a su vez se obtiene información a gran escala.

Las imágenes de satélite que proporcionan sensores como Landsat, han permitido realizar evaluaciones más detalladas sobre las islas de calor en grandes áreas, posibilitan una perspectiva del fenómeno a largo plazo y se elaboran estrategias de mitigación. Variables como la temperatura, la densidad de población y la cobertura vegetal permiten un análisis más preciso de las islas de calor y sus impactos en el entorno urbano.

Igualmente, la modelización numérica ha sido útil para determinar islas de calor, pues mediante esta se puede simular y predecir el comportamiento térmico de una ciudad mediante variables como la geometría urbana, la distribución de usos de suelo entre otras. La ventaja de estos modelos es que pueden ser calibrados y validados con datos reales, mejorando su precisión.

3.2. ÁREA DE ESTUDIO

Toluca es la capital del Estado de México, se encuentra ubicada en $19^{\circ}17'36''$ N de altitud y $99^{\circ}19'24''$ O longitud (Figura 3.1). Su vegetación varía dependiendo la altitud, en las zonas más altas encontramos bosque de coníferas como el pino y el oyamel, en las zonas más bajas predominan los pastizales y matorrales. El clima es templado subhúmedo, en invierno la temperatura desciende por debajo de los 0° mientras que en verano oscila los 25° (Ayuntamiento Toluca, 2023).

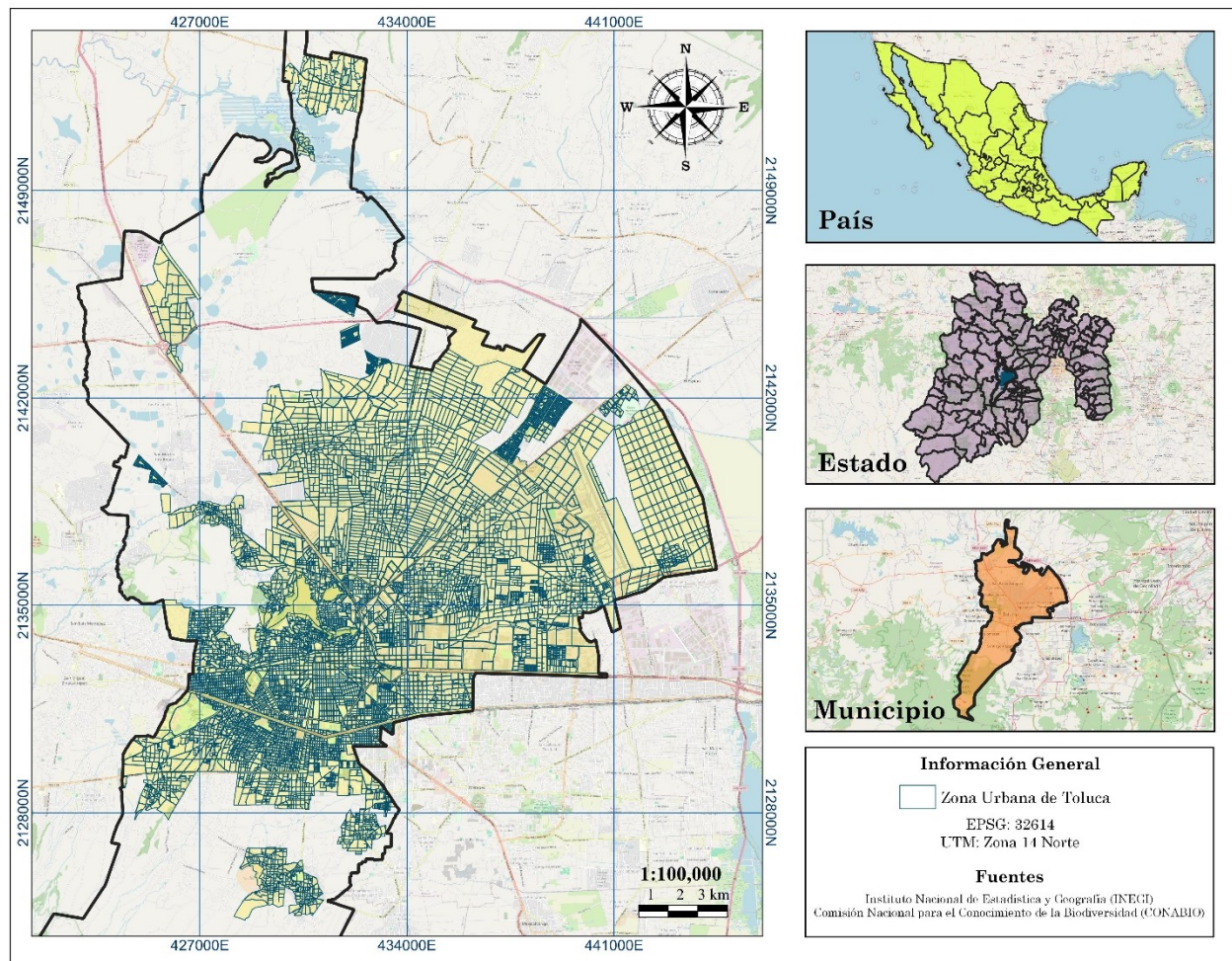


Figura 3.1. Mapa de Localización de la Zona Urbana de Toluca

En cuanto a su población según INEGI en 2020 Toluca contaba con 910,608 habitantes, actualmente es la quinta ciudad más poblada de México y la tercera del Estado de México. Toluca además de poseer una de las zonas industriales más importantes del país, esta geográficamente más cerca de la Ciudad de México ocasionando que haya grandes movildades entre estos 2 espacios debido a la migración por educación o simplemente turismo.

A medida que Toluca se desarrolla y se urbaniza las zonas de vegetación se ven afectadas y las construcciones de edificios, calles y carreteras hacen un panorama más artificial por el uso de materiales que absorben y retienen calor.

Como Toluca está a 2,680 msnm tiene menos capacidad de disipar el calor acumulado, el transporte, las industrias y las actividades humanas generan mucha contaminación y, al estar la ciudad rodeada de montañas, reduce la circulación de aire, atrapando el calor en las zonas urbanas.

3.3. SELECCIÓN DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE.

El estudio de las islas de calor ha sido un tema importante desde años atrás, el modo de análisis ha ido cambiando por la evolución de la tecnología y al acceso que tenemos sobre ella, la información que nos brinda contribuye a una mejor investigación y así se plantean y proponen estrategias para mitigar el problema.

Antes del desarrollo de tecnología y al fácil acceso de datos más precisos autores como Aragón et al. (2020) y Mercado y Marincic (2017) analizaban las islas de calor a través de estaciones meteorológicas, obtenían datos de temperaturas máximas y mínimas, humedad, viento y radiación solar y realizaron mapas que les permitían comparar esas diferencias que había en los distintos puntos de estudio.

Sin embargo en las últimas décadas el uso de satélites ha sido de gran importancia por la información que brinda, para propósitos de islas de calor hay autores que varían en el tipo de satélite dependiendo el objetivo de su estudio, por ejemplo Soberón y Obregón

(2016) utilizan Landsat 5 para analizar 6 eventos ocurridos en LIMA Metropolitana, Soto-Estrada (2018) usa Landsat 7 para estimar la islas de calor en la Región Metropolitana del Vale de Aburrá y Gómez y Amorim (2016) disponen de Landsat 8 para analizar las diferencias de temperatura en la superficie intra-urbanas y rurales en verano e invierno en la ciudad de Ubatuba, Brasil.

Para el cálculo de islas de calor se han empleado diversas fórmulas, entre ellas tenemos cálculo de radiancia (TOA), temperatura de brillo (BT), índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), proporción de vegetación, emisividad (E), temperatura de superficie terrestre (LST) y el perfil de islas de calor (ICU). Aunque es necesario aplicar todas las fórmulas para un resultado más preciso hay autores que se limitan a calcular solo 2 o 4 variables dependiendo del objetivo de su trabajo.

3.4. MÉTODO EMPLEADO.

Para este estudio se utilizaron imágenes satelitales Landsat 8 obtenidas desde el servidor de imágenes Earth Explorer (USGS, 2023) perteneciente al Servicio Geológico de los Estados Unidos o USGS por sus siglas en inglés (United States Geological Survey). En esta plataforma las imágenes seleccionadas corresponden a la colección 1 nivel 1 de los años 2018 y 2022.

Para un estudio que requiere imágenes satelitales es ideal que estén libre de nubes, si muestra un alto porcentaje de nubosidad limita la visibilidad de objetos en la tierra, provocan sombras y distorsiona tonalidades. Al hablar de islas de calor el porcentaje deseado (10%) facilita la interpretación.

Según la USGS (2018) estas imágenes son captadas por 2 sensores: El Operational Land Imager (OLI) que captura las bandas 1– 9 y el sensor infrarrojo térmico (TIRS) que captura las bandas 10 y 11, con una resolución espacial de 30 y 100 metros respectivamente.

Para el tratamiento de las imágenes satelitales se procesó con el sistema de información geográfico ArcGIS 10.3 y su herramienta Calculadora Ráster para interactuar con las bandas de la imagen satelital.

Dado que se analizan las islas de calor correspondientes a los años 2018 y 2022, se presentarán únicamente los períodos que muestran una mayor variabilidad en los datos. Para lograr una representación más efectiva, seleccionamos un mes representativo de cada una de las cuatro estaciones del año: primavera, verano, otoño e invierno.

A continuación, se describe cada una de las imágenes utilizadas en este estudio. Como se puede apreciar en la Tabla 3.1, las imágenes fueron adquiridas mediante el sensor OLI-TIRS, que se encuentra a bordo del satélite Landsat 8. Estas imágenes cuentan con un total de 9 bandas espectrales, ofreciendo una resolución espacial de 30 metros, lo que permite una visualización precisa de los datos (Ariza, 2013).

Tabla 3.1. Información General de Imágenes

Satélite	Sensor	Pixel	Nubosidad %	Día de Adquisición	Estación del Año
LANDSAT_8	OLI_TIRS	30	0.24	2018-01-10	INVIERNO
LANDSAT_8	OLI_TIRS	30	5.48	2018-05-18	PRIMAVERA
LANDSAT_8	OLI_TIRS	30	3.87	2018-06-03	VERANO
LANDSAT_8	OLI_TIRS	30	11.26	2018-11-10	OTOÑO
LANDSAT_8	OLI_TIRS	30	0.06	2022-01-05	INVIERNO
LANDSAT_8	OLI_TIRS	30	4.86	2022-05-05	PRIMAVERA
LANDSAT_8	OLI_TIRS	30	11.12	2022-06-30	VERANO
LANDSAT_8	OLI_TIRS	30	13.31	2022-11-13	OTOÑO

En la tabla 3.1 se pueden apreciar los meses seleccionados para 2018 y 2022 (enero, mayo, junio y noviembre), ya que durante estos períodos se logra capturar de manera más efectiva el comportamiento de las variables calculadas, tales como el Índice de

Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), la Temperatura de Superficie Terrestre (LST) y el Índice de Cobertura de Suelo (ICS).

3.4.1. CÁLCULO DE LA RADIANCIA (TOA)

Conversión al resplandor de la parte superior de la atmosfera (TOA): El cálculo de la reflectancia TOA se realiza de manera un poco diferente para diferentes tipos de datos. Para Landsat 8, hay otro conjunto de coeficientes de calibración (Libretexts, 2022).

Utilizando el factor de reescalado de radiancia, los números digitales infrarrojos térmicos se pueden convertir a TOA resplandor espectral.

$$TOA(L(\lambda)) = ML * Q_{cal} + A_l - O_i \quad (1)$$

TOA_λ = Radiancia espectral total

M_L = Factor de rescalamiento multiplicativo específico de banda (valor disponible en el archivo de metadatos MTL, en la línea RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda).

Q_{cal} = Corresponde a la banda 10

A_l = Factor de rescalamiento aditivo específico de la banda (valor disponible en el archivo de metadatos MTL, en la línea RADIANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de banda).

O_i = El valor de corrección de la banda 10 = 0.29

El cálculo de la radiancia (TOA) es utilizada para medir la cantidad de energía electromagnética que llega a la parte superior de la atmósfera terrestre desde una fuente externa como el sol. Su cálculo resulta importante porque comprende y predice el clima y fenómenos atmosféricos como la formación de nubes o la distribución de la temperatura en la atmósfera. Ayuda a evaluar como el aumento de las concentraciones de gases de

efecto invernadero en la atmósfera afecta el equilibrio radioactivo de la tierra, así como la estimación de la reflectividad de la superficie terrestre.

3.4.2. CONVERSIÓN A TEMPERATURA DE BRILLO (BT) EN LA PARTE SUPERIOR DE LA ATMÓSFERA (TOA)

La temperatura de brillo de una superficie generalmente se determina mediante una medición óptica, con la intención de determinar la temperatura real de una superficie y se puede calcular en algunos casos dividiendo la temperatura de brillo por la emisividad de la superficie. Esta temperatura Caracteriza la radiación y dependiendo del mecanismo de radiación, puede diferir considerablemente de la temperatura física de un cuerpo radiante (AcademiaLab, s. f).

Datos de Radiancia Espectral: se puede convertir la temperatura de brillo superior de la atmósfera utilizando la constante térmica.

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left[\left(\frac{K_1}{L\lambda}\right)+1\right]} - 273.15 \quad (2)$$

BT= Temperatura de brillo superior a la atmósfera

K_1 y K_2 = Constantes de conversión térmica específicas de la banda a partir de los metadatos.

L_n = Logaritmo natural

λ = Radiancia espectral TOA

Resultado en Celsius, temperatura radiante = -273.15

La fórmula de conversión a temperatura de brillo permite estimar la temperatura superficial de la tierra a partir de mediciones obtenida por satélites. Estas mediciones resultan fundamentales para comprender el fenómeno de las islas de calor, ya que estima la temperatura de la superficie con precisión e identifica aquellas áreas donde se presenta

mayor acumulación de calor. Además, compara mediciones obtenidas en diferentes lugares y momentos, facilitando el monitoreo a largo plazo.

3.4.3. ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA

La reflectancia espectral de la vegetación a través de diferentes bandas medidas por un sensor sirve como un indicador de la presencia de plantas o árboles y su estado general.

Por lo tanto, un índice de vegetación es una combinación matemática de dos o más bandas espectrales que mejora el contraste entre la vegetación (que tiene alta reflectancia) y el suelo desnudo, las estructuras artificiales (Toribio, 2020).

Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI): es un índice estandarizado que se calcula utilizando bandas de infrarrojo cercano (Banda 5) y Rojo (Banda 4).

$$NDVI = \frac{NIR(banda\ 5) - Red(banda\ 4)}{NIR(banda\ 5) + Red(banda\ 4)} \quad (3)$$

NDVI= Índice de vegetación

NIR= Representa la banda del infrarrojo cercano (Banda 5)

RED= Representa la banda roja (Banda 4).

El NDVI es una medida para estimar la cantidad de vegetación en un área determinada, se calculó a partir de la diferencia entre el espectro de reflectancia del infrarrojo cercano y el espectro de reflectancia del rojo en una imagen satelital para cada uno de los periodos (figura 3.2, figura 3.3).

En el contexto de islas de calor, cuando se identifican zonas con vegetación se asume que hay un equilibrio en la temperatura ya que se proporciona sombra, se absorbe calor y se libera oxígeno.

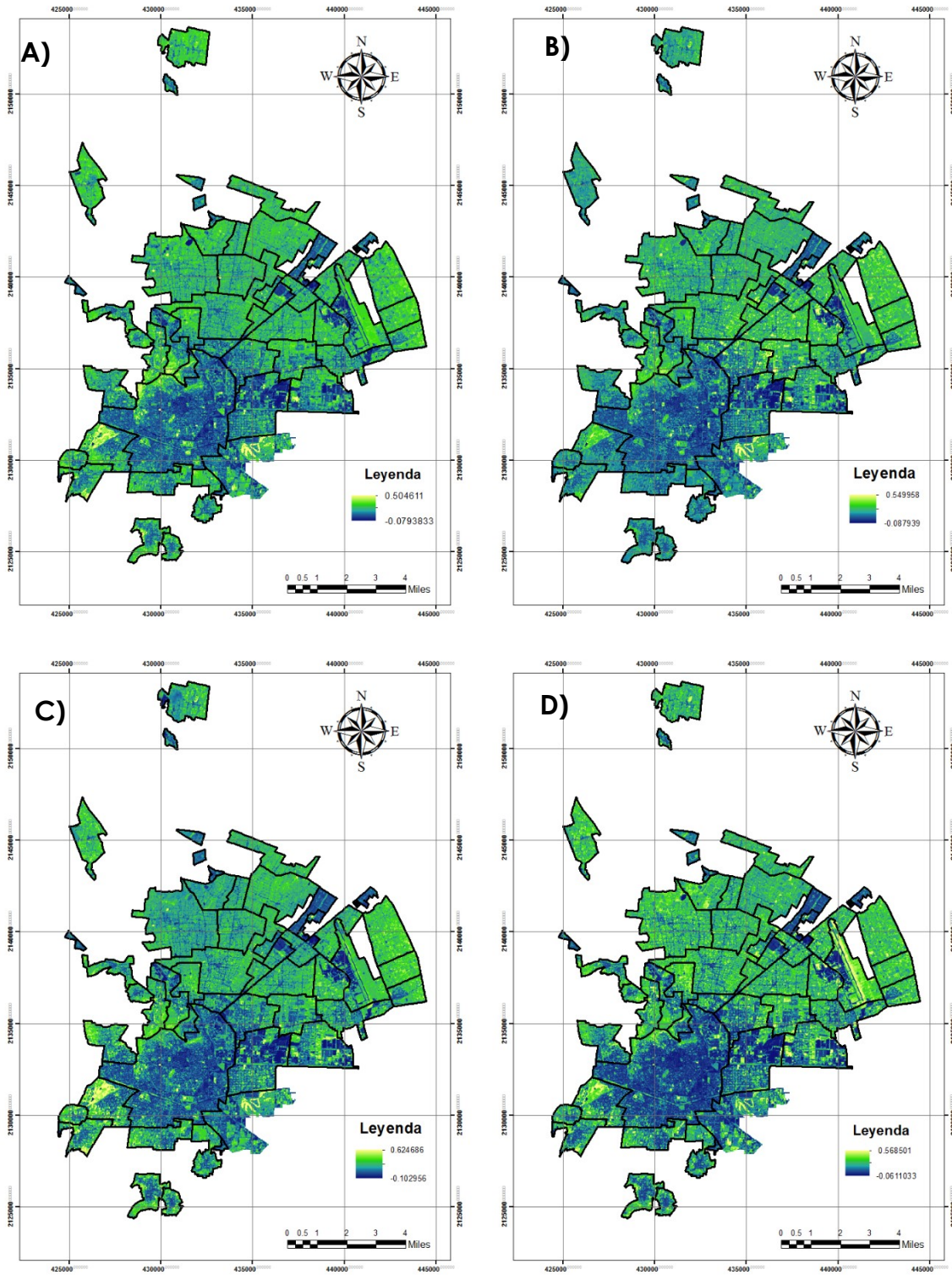


Figura 3.2. Cálculo de NDVI para 2018: A) Enero; B) Marzo; C) Junio; D) Noviembre.

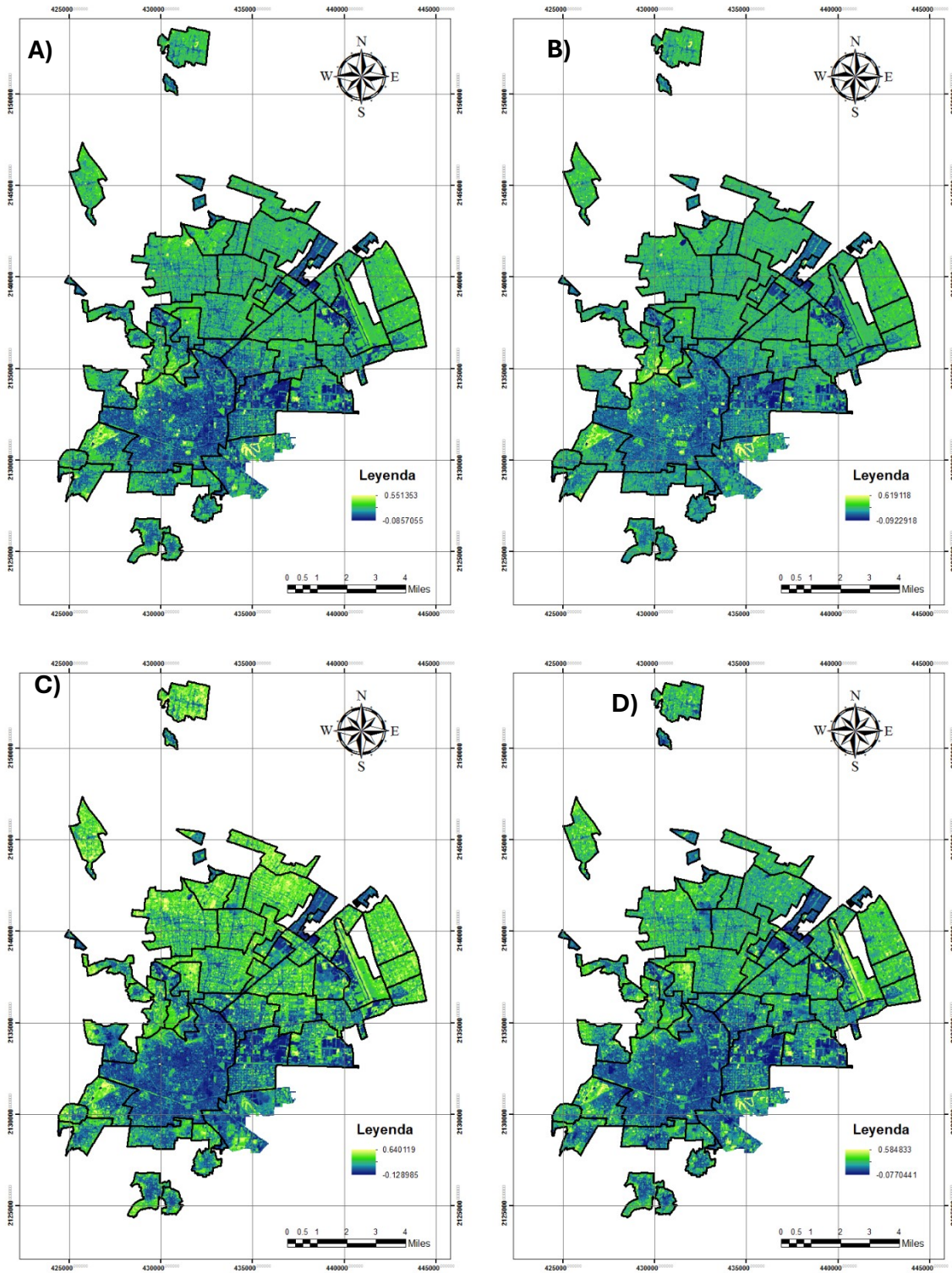


Figura 3.3. Cálculo de NDVI para 2022: A) Enero; B) Marzo; C) Junio; D) Noviembre.

3.4.4. PROPORCIÓN DE VEGETACIÓN (PV)

Esta fórmula ayuda a determinar la proporción de vegetación en relación con otras características del paisaje, como edificios, carreteras, y otros elementos urbanos y se determina a partir de los datos que arroja el NDVI:

$$PV = Square \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (4)$$

PV= Proporción de vegetación

NDVI= Índice de vegetación de diferencia normalizada

NDVI_{min}= Índice de vegetación de diferencia normalizada mínimo (datos visualizados en la imagen)

NDVI_{max}= Índice de vegetación de diferencia normalizada máximo (datos visualizados en la imagen)

La fórmula de proporción de vegetación se utiliza para calcular la cantidad de área verde en relación con la cantidad de área urbana en un entorno determinado, con ella se determina la cantidad de áreas verdes presentes y su impacto en la reducción de la temperatura ambiente. Esta información permite tomar decisiones sobre el diseño de las áreas verdes en las ciudades para combatir los efectos negativos de las islas de calor y al mismo tiempo mejorar la vida de los habitantes.

3.4.5. EMISIVIDAD

La emisividad es la medición de la capacidad de un objeto de emitir energía infrarroja. El valor de la emisividad se calcula por la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debido a una diferencia de temperatura con su entorno. La emisividad de un cuerpo depende, en teoría, del material, del acabado de su superficie, de la temperatura, de la longitud de onda, del ángulo de medición y, bajo determinadas circunstancias, también del dispositivo usado para la medición (Fluke Process Instruments, s. f) y (Antogarpe, 2022).

Emisividad: Es la emisividad promedio de un elemento de la superficie de la tierra calculada a partir de valores NDVI.

$$E: 0.004 * PV + 0.986 \quad (5)$$

E= Emisividad

Pv= Proporción de vegetación

Valor de corrección de ecuación = 0.986

La emisividad es la medida de la capacidad de un material para emitir y absorber radiación térmica, esto da lugar a temperaturas más altas en zonas densamente construidas. Aquellos materiales con una alta emisividad absorben y emiten más radiación térmica que los materiales con una emisividad más baja.

3.4.6. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE

Es un parámetro que complementa en buena medida las mediciones de temperatura, especialmente en zonas urbanas donde se concentran en poco espacio materiales diferentes. Por lo tanto, se estima a partir de las temperaturas de brillo de la parte superior de la atmósfera de los canales espectrales infrarrojos, que se obtienen desde los sensores térmicos instalados en los satélites geoestacionarios.

Los valores de la temperatura superficial terrestre dependen también de otros factores como la influencia del albedo, la cubierta vegetal y la humedad del suelo (Data, 2019).

LST: Es la temperatura radiactiva que se calcula utilizando la parte superior de la atmósfera, temperatura de brillo, longitud de onda de radiación emitida y la emisividad de la superficie terrestre.

$$LST = \frac{BT}{\left\{1 + \left[\left(\frac{\lambda * BT}{c2}\right) In \epsilon\right]\right\}} \quad (6)$$

Bt = Temperatura de brillo superior de la atmósfera

λ = Longitud de onda de la radiación 0.00115

E: Emisividad de la superficie terrestre

$C_2 = 1.4388$

L_n = Logaritmo natural

Los valores de λ para landsat 8: para la banda 10 es 10.8 y para la banda 11 es 12.0

La fórmula de la temperatura de la superficie terrestre mide la temperatura promedio de la superficie en un determinado lugar, su medición es crucial para entender como las actividades humanas y las características del entorno influyen en el clima local. Gracias a este cálculo se puede entender y abordar el fenómeno de las islas de calor contribuyendo a la creación de entornos urbanos sostenibles y saludables (Figura 3.4, Figura 3.5).

3.4.7. PERFIL DE LAS ISLAS DE CALOR URBANO

ICU: Fenómeno en que las áreas urbanas experimentan mayores temperaturas debido a las actividades humanas y al entorno construido.

$$ICU = \frac{LST - LST_m}{LST_{std}} \quad (7)$$

ICU = Islas de Calor Urbano

LST = Temperatura de la Superficie Terrestre

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

LST_{std} = Desviación estándar de la temperatura

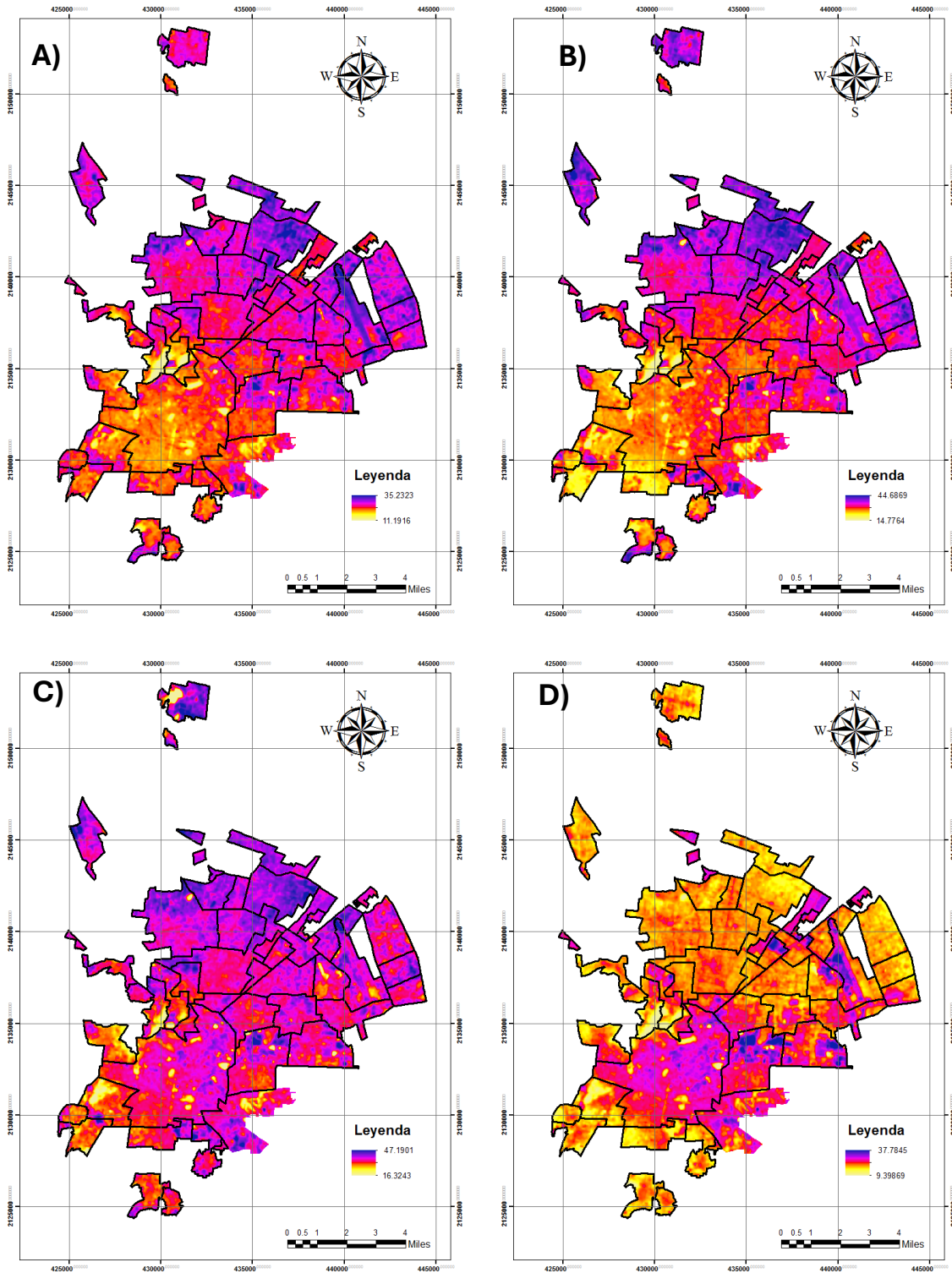


Figura 3.4. Cálculo de LST para 2018: A) Enero; B) Marzo; C) Junio; D) Noviembre.

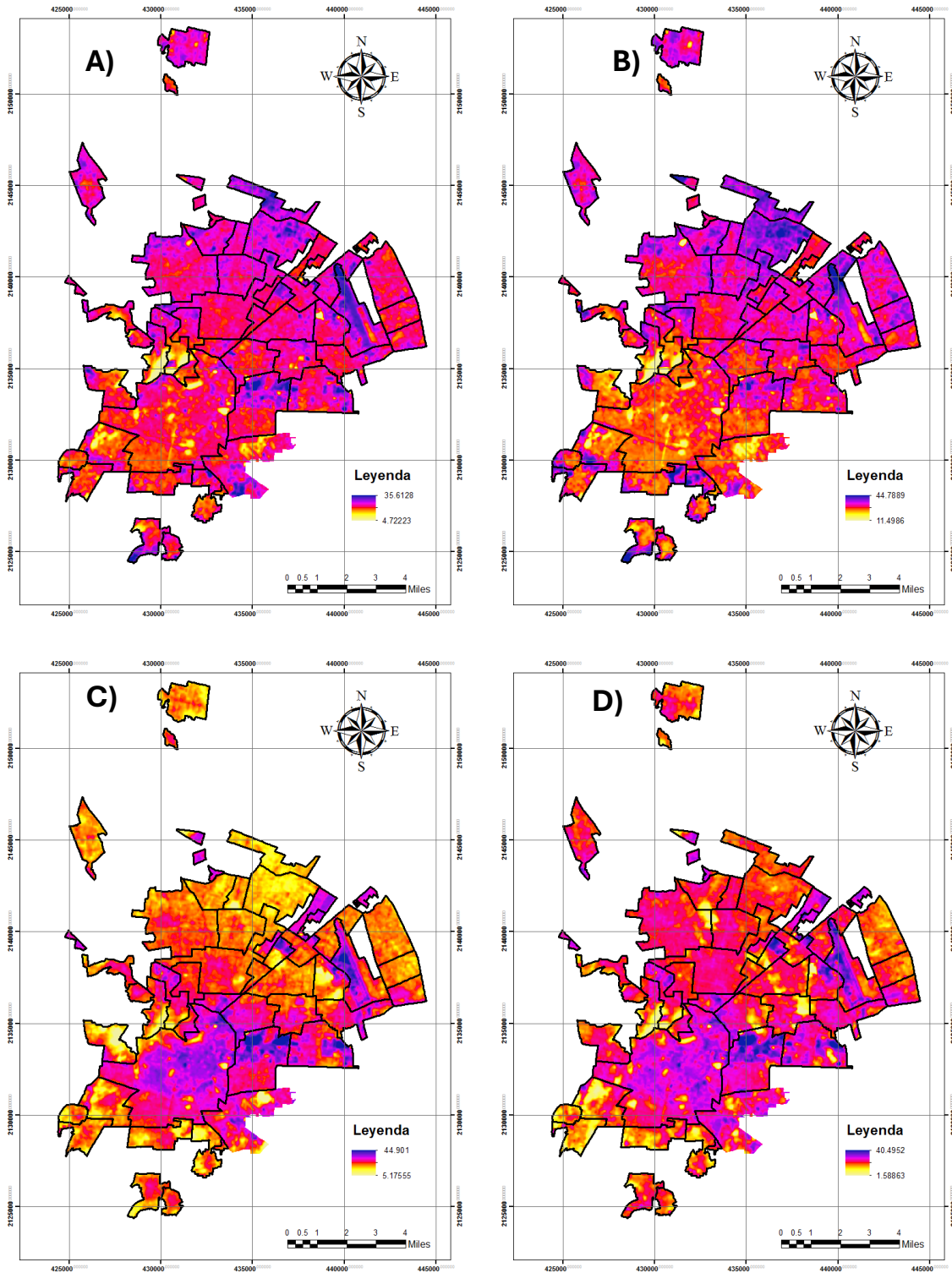


Figura 3.5. Cálculo de LST para 2022: A) Enero; B) Marzo; C) Junio; D) Noviembre.

Esta fórmula es utilizada para medir y analizar la temperatura en diferentes áreas de una ciudad, se basa principalmente en la observación de la variación de la temperatura en diversos puntos e identifica áreas donde se produce un incremento significativo de temperatura. Gracias a esto podemos saber los impactos negativos en la población, en el consumo de energía y en el medio ambiente.

Es importante mencionar que para el análisis de este trabajo se eligieron los años 2018 y 2022, 2018 fue el año que a nivel mundial se presentó la pandemia por el virus COVID 19 y 2022 porque fue el año en el que se empezaron a reestablecer las actividades de la vida cotidiana, de esta manera podemos apreciar las diferencias entre año con pandemia y un año sin pandemia (figura 3.6 y figura 3.7).

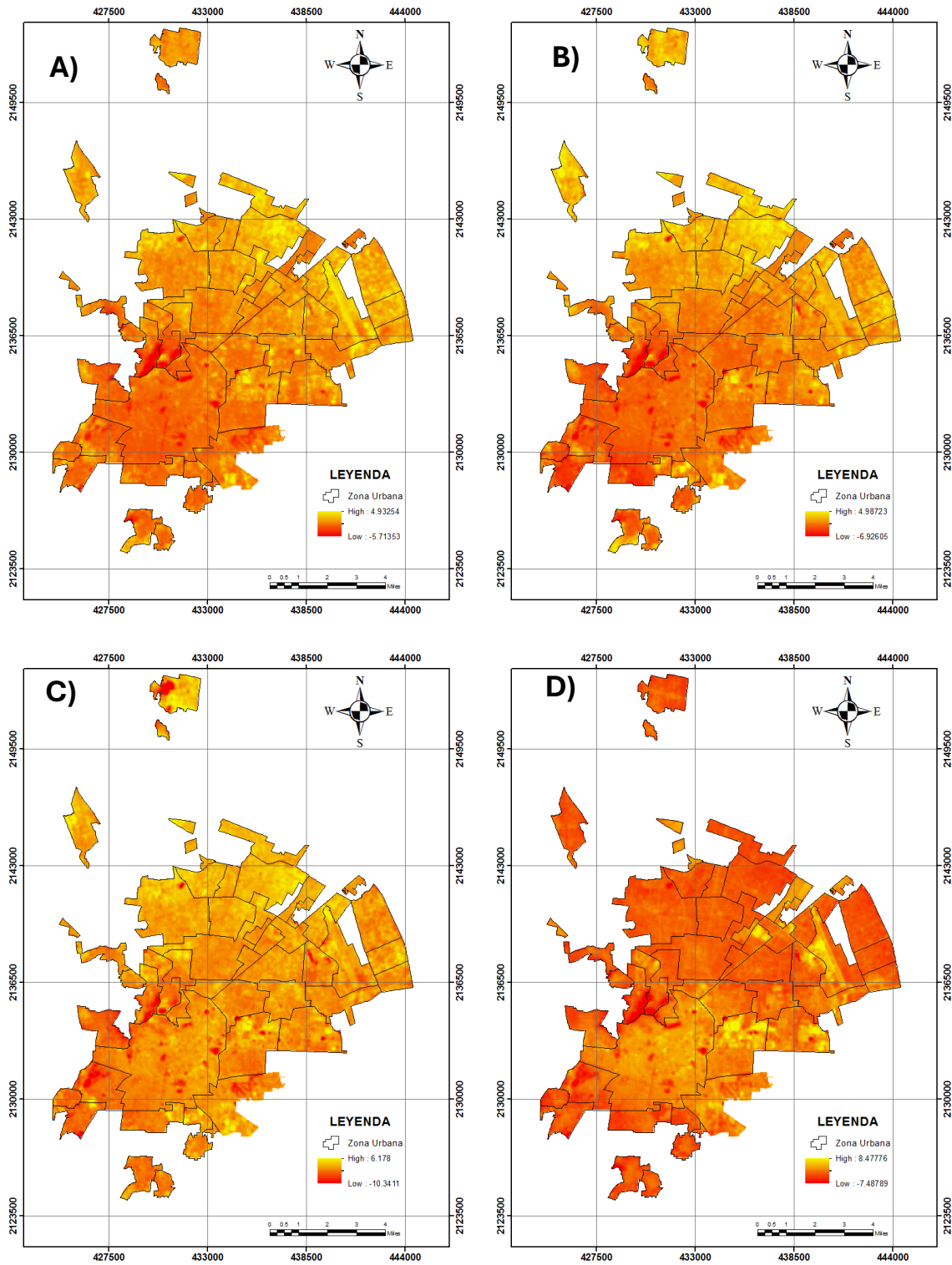


Figura 3.6. Cálculo de ICU para 2018: A) Enero; B) Marzo; C) Junio; D) Noviembre.

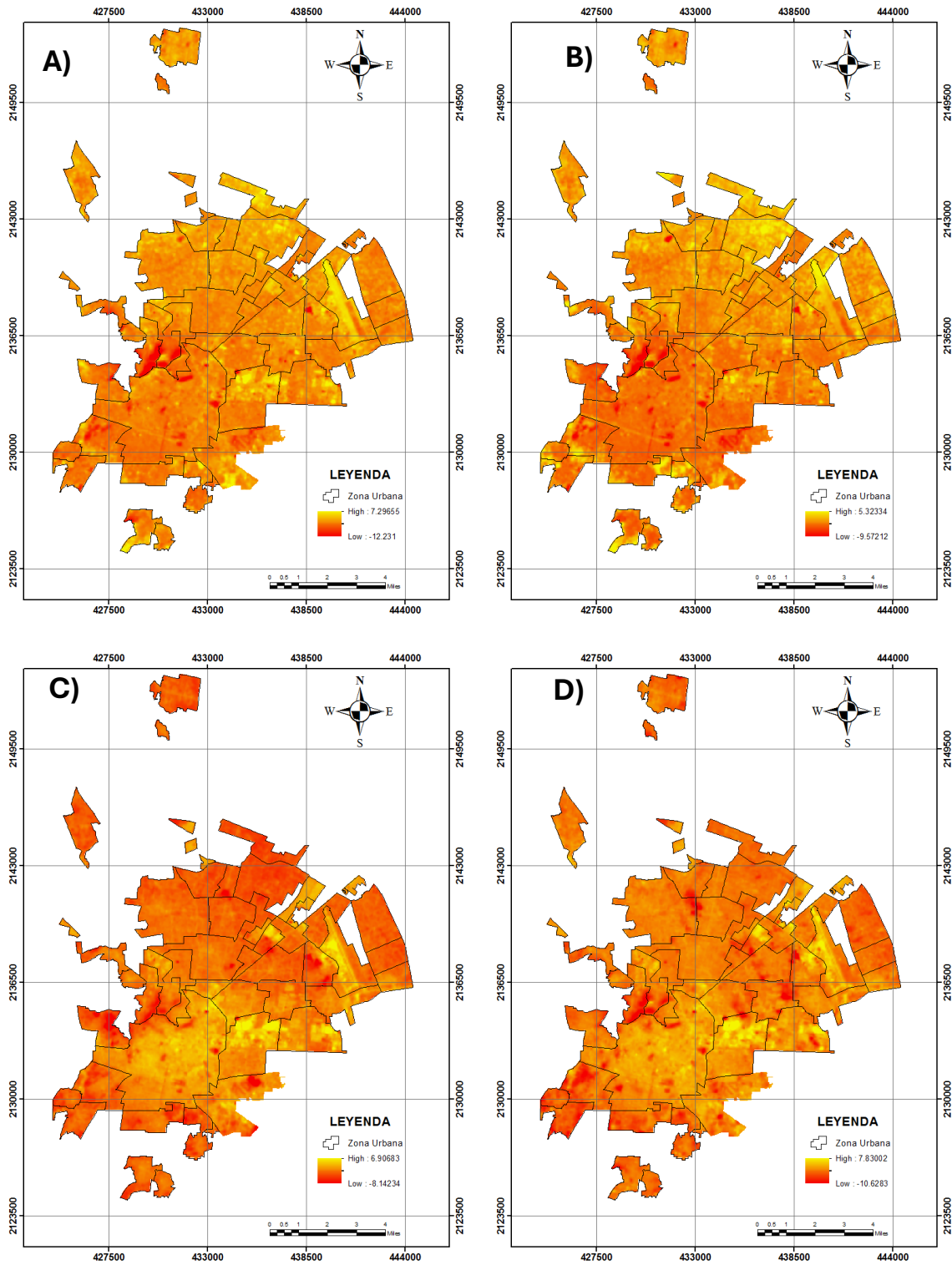


Figura 3.7. Cálculo de ICU para 2022: A) Enero; B) Marzo; C) Junio; D) Noviembre.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es un índice derivado de la observación en imágenes de percepción remota, se basa en la relación entre la cantidad de luz reflejada por la superficie (reflectancia) y la luz roja e infrarroja (infrarrojo cercano) (De Estadística y Geografía, s. f).

Cuando calculamos en NDVI definimos y visualizamos aquellas áreas con vegetación y al mismo tiempo detectamos cambios anormales por causas antrópicas o naturales.

Anteriormente calculamos en NDVI de manera general, sin embargo, para tener una mejor visualización de los valores se realizó una reclasificación para cada mes. Esta clasificación fue basada en su mayoría con los valores de Vargas et al. (2019), a continuación, se presentan los valores considerados (tabla 4.1).

Tabla 4.1. Categorías del Índice de Vegetación

Descripción	Categoría	Color
Nubes, zonas de agua o terrenos desnudos.	< 0	Red
Cobertura vegetal casi ausente, presencia de arena y rocas.	0 - 0.2	Orange
Cobertura vegetal baja, vitalidad baja y presencia de arbustos y pradera.	0.2 – 0.4	Yellow
Cobertura vegetal media saludable, vitalidad media.	0.4 – 0.6	Light Green
Cobertura vegetal alta, vitalidad alta, planta saludable.	> 0.6	Dark Green

Basado en Vargas et al. (2019).

Conocer la vitalidad de la vegetación es fundamental cuándo hablamos de un índice de calor urbano, ya que la vegetación juega un papel importante en la regulación del clima urbano.

Una vegetación saludable y vigorosa puede reducir la temperatura urbana mediante la evapotranspiración, la sombra y por supuesto la absorción de los gases de efecto invernadero. Y por otro lado la vegetación débil o escasa puede aumentar la temperatura urbana favoreciendo precisamente el índice de calor urbano.

En la tabla 4.2 se muestra la clasificación de la vitalidad de la vegetación a través de la cual es sencillo identificar áreas que requieren intervenciones para mejorar la cobertura vegetal y de esa manera mitigar el índice de calor urbano.

Tabla 4.2. Vitalidad de la Vegetación

<i>Clasificación</i>	<i>Características</i>
<i>Sin Vegetación</i>	Vegetación muy densa y saludable, típicamente bosques o selvas en su máximo esplendor de crecimiento.
<i>Muy Baja</i>	Cobertura de vegetación muy escasa o en malas condiciones; puede incluir zonas de suelos áridos o semiáridos.
<i>Baja</i>	Vegetación escasa o en estrés; corresponde a áreas con matorrales o vegetación en suelos degradados.
<i>Moderada</i>	Vegetación menos densa o en condiciones no óptimas; pueden incluir áreas de pastizales.
<i>Alta</i>	Vegetación saludable y moderadamente densa, como campos de cultivo y áreas forestales.
<i>Muy Alta</i>	Vegetación muy densa y saludable, típicamente bosques o selvas en su máximo esplendor de crecimiento.

Basado en Tucker (1979)

En base a las características mencionadas anteriormente, se presentan los índices de vegetación para los meses de enero, marzo, junio y noviembre con el fin de analizar los cambios de cobertura vegetal y comprender su comportamiento en ambos años.

Enero 2018: Durante este mes, que corresponde al invierno, se observa en el municipio de Toluca una vegetación limitada en vitalidad. Los valores NDVI muestran

predominancia de áreas con índices inferiores a 0, particularmente en el centro del municipio, que representan terrenos sin vegetación o áreas de agua, debido al crecimiento urbano y cambios en el uso de suelo.

En contraste, en la zona norte del municipio se presentan valores NDVI en el rango de 0.2 a 0.4, lo que indica una cobertura vegetal baja o de vitalidad limitada, correspondiente a arbustos y pastizales en condiciones de salud moderada.

Este comportamiento puede deberse a las bajas temperaturas típicas de la estación, que afectan el crecimiento y la resistencia de la vegetación. La vegetación, aunque presente en ciertas áreas, no muestra un vigor elevado debido a la falta de condiciones climáticas favorables, lo cual se refleja en los valores NDVI intermedios. El análisis de enero de 2018 destaca la presencia de vegetación media en ciertas áreas, pero el impacto de las zonas urbanas es notorio al observar menores valores en el centro.

Enero de 2022: Comparando con 2018, en enero de 2022 se observa un cambio significativo en los valores de NDVI. La vegetación en el norte del municipio muestra una reducción en su vitalidad, lo cual se refleja en la disminución de áreas con valores entre 0.4 y 0.6, ahora limitados a zonas más pequeñas.

Esto sugiere un deterioro de la vegetación, posiblemente vinculado con la expansión urbana y la disminución de áreas verdes en el centro y norte del municipio.

El crecimiento urbano ha incrementado las áreas con NDVI menor a 0, que abarcan un mayor espacio en el centro del municipio, reflejando un incremento de superficies impermeables y áreas con muy baja o nula vegetación. Estos cambios reflejan una presión continua en la vegetación, ocasionada por la expansión de infraestructura y la reducción de espacios naturales en áreas urbanas (Figura 4.1).

Marzo de 2018: En este mes de primavera, la vegetación comienza a mostrar una mayor vitalidad comparada con los meses de invierno. Los valores NDVI en 2018 presentan un incremento en el rango de 0.2 a 0.4, especialmente en el norte, reflejando una cobertura vegetal que comienza a recuperarse.

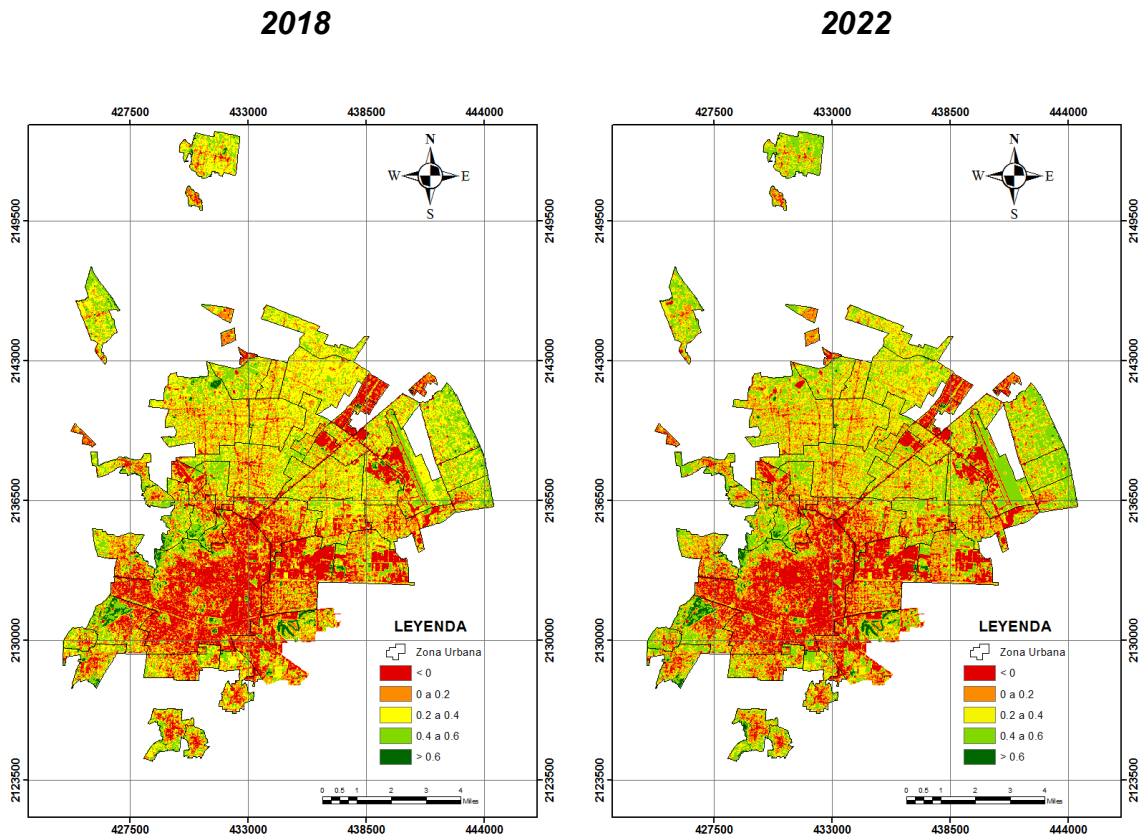


Figura 4.1. Índice de Vegetación para el mes de enero

En las zonas del sur y centro, los valores NDVI menores a 0 sugieren la persistencia de áreas urbanizadas y pavimentadas con mínima o nula vegetación. El aumento de valores en el rango de 0.4 a 0.6, aunque limitado a algunas áreas específicas, evidencia zonas con vegetación de vitalidad media en proceso de crecimiento.

Marzo de 2022: En comparación con 2018, marzo de 2022 muestra una notable expansión de áreas con valores de NDVI entre 0 y 0.2 en el sur y el norte del municipio, lo cual podría estar relacionado con la intensificación del cambio de uso de suelo hacia el desarrollo urbano. La reducción en la vitalidad de la vegetación es especialmente evidente al comparar las áreas con NDVI de 0.4 a 0.6, que en 2018 ocupaban una mayor extensión. Este patrón indica un retroceso en la cobertura vegetal saludable y puede atribuirse a la expansión urbana que ha desplazado áreas vegetadas (figura 4.2).

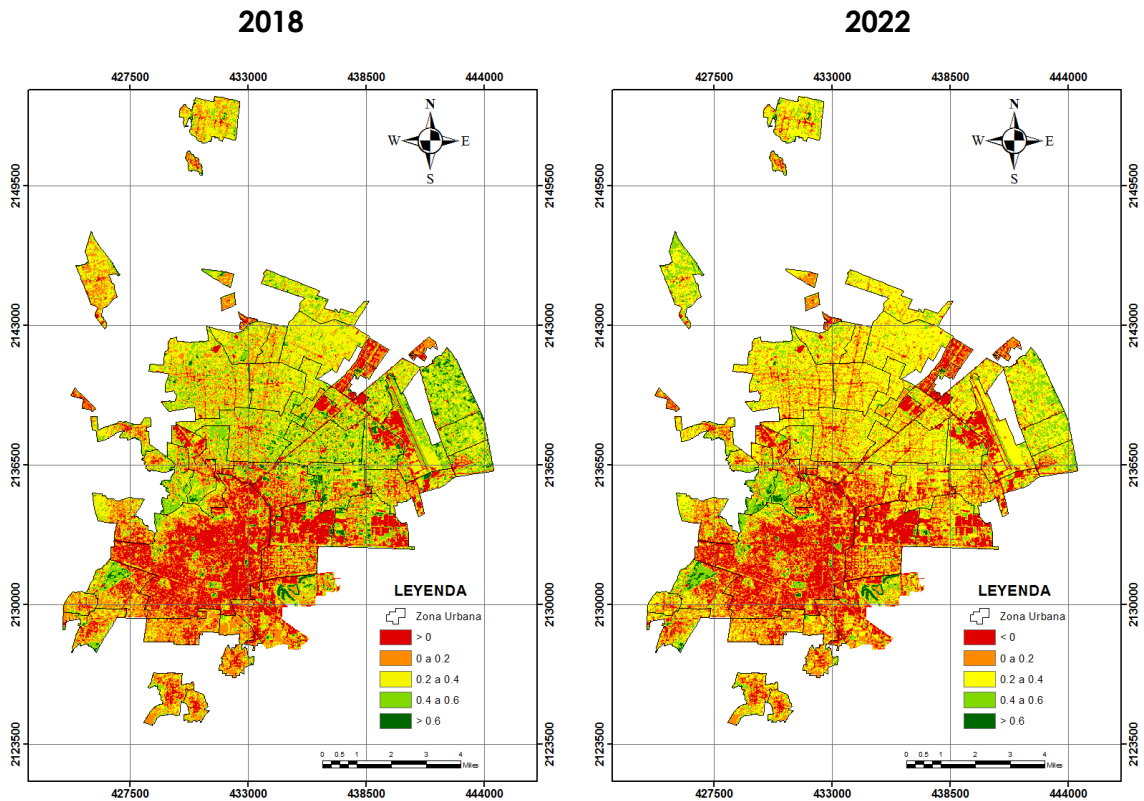


Figura 4.2. Índice de Vegetación para el mes de Marzo

Junio de 2018: En verano, las condiciones de lluvia y temperatura suelen favorecer el crecimiento vegetal. En junio de 2018, los valores de NDVI en el rango de 0.4 a 0.6 se distribuyen en mayor proporción en el norte y noreste del municipio, mostrando una vegetación en buena condición de salud y vitalidad. Los valores superiores a 0.6, aunque concentrados, indican áreas con una vegetación densa, probablemente debido al efecto positivo de las lluvias en este periodo.

Junio de 2022: Comparando los valores de junio de 2022, se observa un incremento en las áreas con valores de NDVI superiores a 0.6 en grandes localidades, lo cual indica una respuesta positiva de la vegetación ante condiciones climáticas favorables, tales como la temporada de lluvias. Este incremento de vitalidad puede estar asociado a mejoras temporales en las condiciones ambientales, pese a la creciente presión urbana en ciertas áreas del municipio. En general, junio de 2022 refleja un patrón positivo para la vegetación en términos de densidad y salud (figura 4.3).

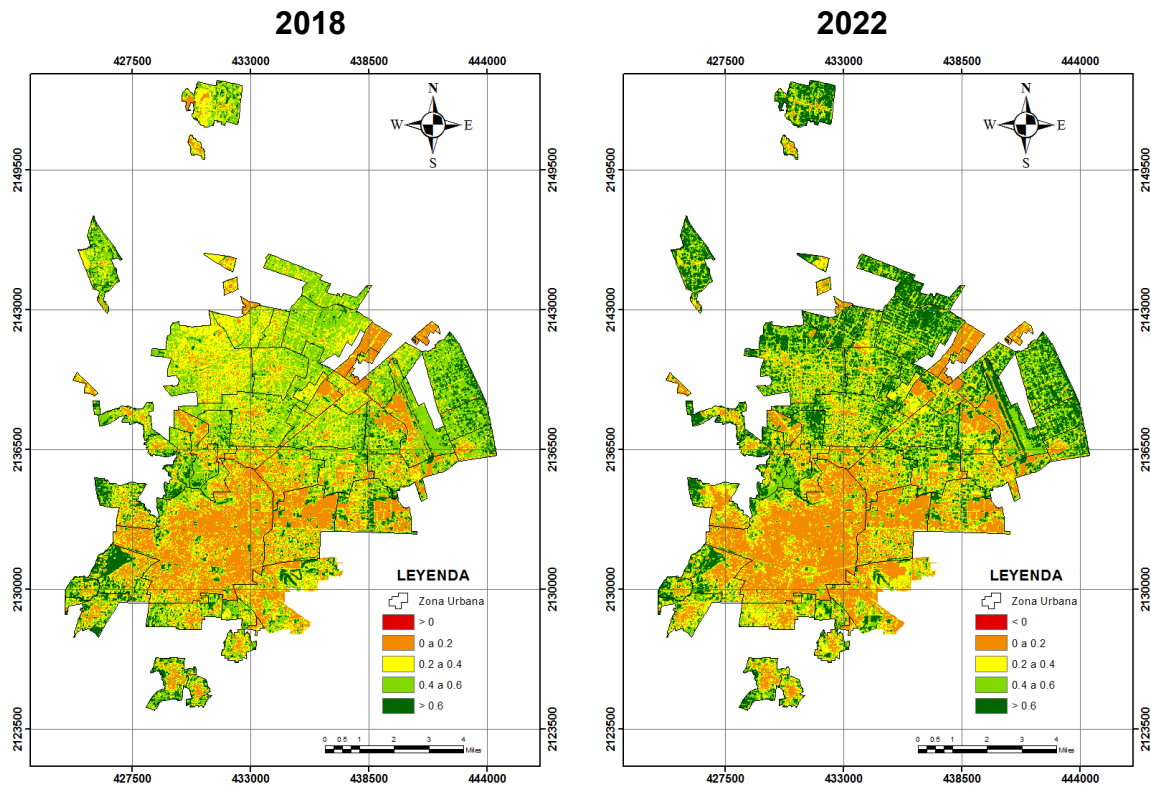


Figura 4.3. Índice de Vegetación para el mes de Junio

Noviembre de 2018: En otoño, la vegetación en el municipio de Toluca muestra signos de reducción en su vitalidad a medida que las condiciones de crecimiento se vuelven menos favorables. En noviembre de 2018, el análisis de NDVI presenta valores en el rango de 0.2 a 0.4 en el norte del municipio, lo que sugiere una cobertura vegetal media en proceso de declive. Las áreas del centro, con valores inferiores a 0, siguen reflejando la expansión urbana.

Noviembre de 2022: En noviembre de 2022, se observan patrones similares en los valores de NDVI menores a 0 en el centro y sur, pero con una expansión hacia algunas localidades en el norte. Esto refleja una mayor pérdida de vegetación debido al crecimiento urbano en comparación con 2018. Las áreas con valores entre 0.4 y 0.6 han disminuido notablemente, mostrando una vegetación menos vigorosa y un retroceso en su capacidad de resistencia y regeneración (figura 4.4).

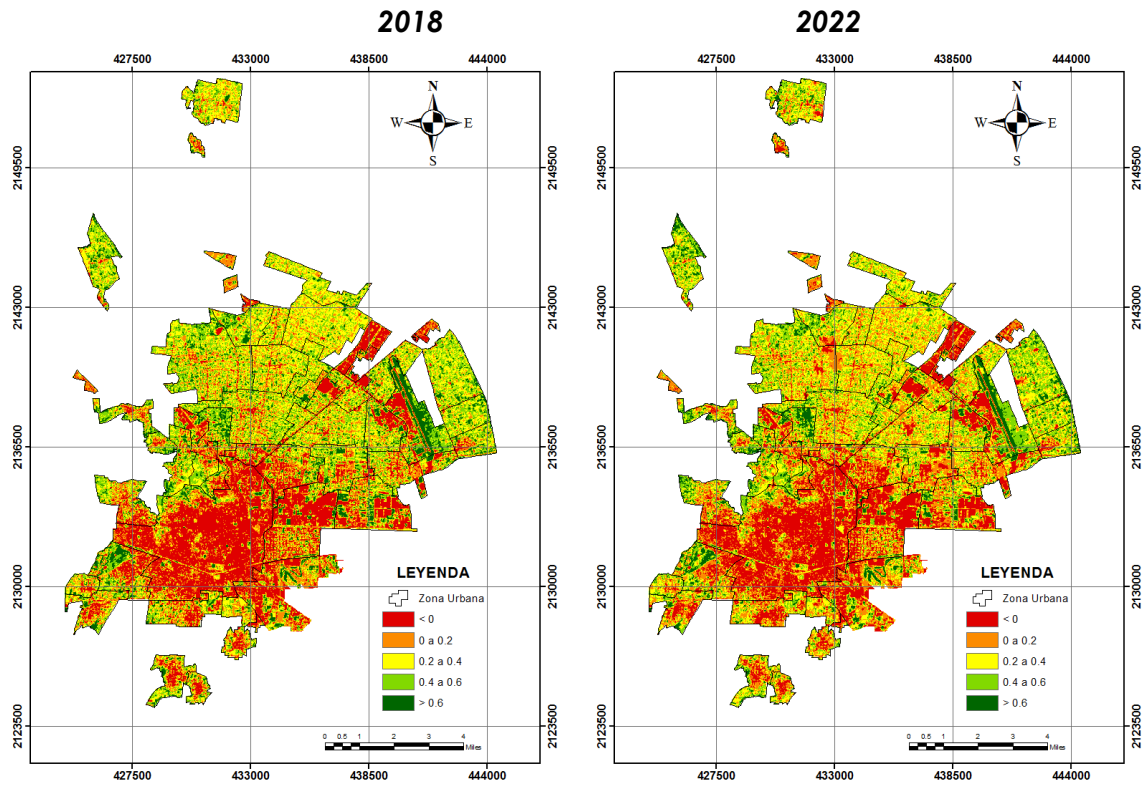


Figura 4.4. Índice de Vegetación para el mes de Noviembre

Categorías Generales

Las variaciones en el índice de vegetación entre estos 2 años reflejan cambios significativos, debido a factores como la actividad humana, la introducción de especies no nativas y de variaciones en la calidad del suelo, como la erosión. Este cambio de uso de suelo refiere a una transformación que sufre un área de tierra determinada, generalmente cambiando de uso agrícola-forestal-natural a urbano-comercial-industrial.

Para el municipio de Toluca este cambio de uso de suelo o cobertura vegetal puede deberse a diversos elementos, entre ellos tenemos principalmente el crecimiento poblacional. Según el censo de INEGI 2020, la población del municipio de Toluca era de 910,608 habitantes, lo que representa un aumento del 11 % respecto al 2010. Estos crecimientos y cambios de uso reducen la cobertura vegetal incrementando la degradación del suelo, además de las condiciones climáticas que influyen de manera directa en la vitalidad de la vegetación.

Como observamos enero, marzo y noviembre presentan una secuencia similar que indica que durante esos meses la vegetación en el centro del municipio padece una vitalidad baja, donde las hojas de las plantas tienen un crecimiento lento y limitado, causando una menor resistencia a condiciones adversas. Por otra parte, junio para ambos años muestra otro comportamiento, ya que referimos a un mes con lluvias la vegetación presenta mejor vitalidad, donde las plantas tienen un crecimiento vigoroso y una mejor resistencia.

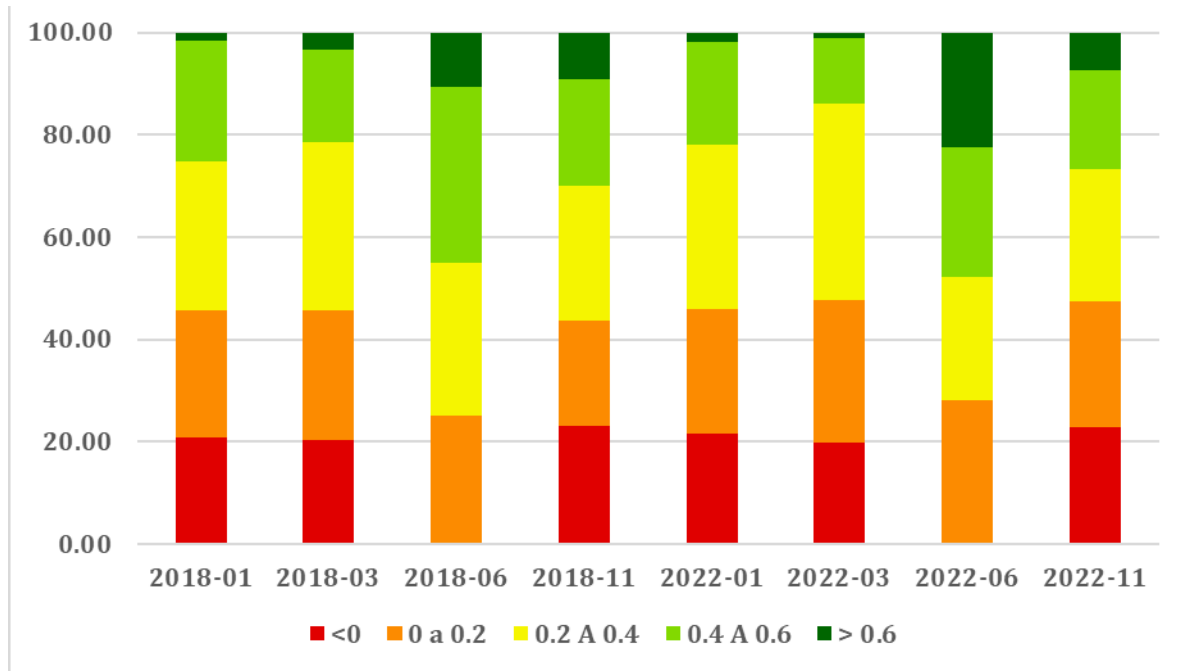
Estos cambios siempre refieren a la transformación y utilización del terreno sea de uso no urbano (agrícola, forestal o natural) o de uso urbano (residencial, comercial o industrial). El crecimiento poblacional, el desarrollo económico, la disminución de actividad agrícola y la construcción de proyectos de infraestructura como carreteras, puentes y transporte son algunos de los factores que condicionan el tipo de cobertura vegetal (tabla 4.3, gráfica 4.1).

Tabla 4.3. Porcentaje de áreas de las categorías del NDVI

FECHA	< 0.0	0.0 – 0.2	0.2 – 0.4	0.4 – 0.6	> 0.6
2018-01	20.8	24.9	29.1	23.6	1.6
2018-03	20.2	25.5	32.9	18.1	3.3
2018-06	0.0	25.0	30.0	34.3	10.7
2018-11	23.1	20.6	26.3	20.8	9.2
2022-01	21.5	24.4	32.0	20.3	1.8
2022-03	19.9	27.9	38.2	12.9	1.1
2022-06	0.0	28.0	24.1	25.5	22.4
2022-11	22.9	24.6	25.9	19.2	7.4

Elaboración Propia (2024)

Gráfica 4.1. Porcentaje de áreas con base en categorías del Índice de Vegetación









4.2. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE (LST)

La temperatura de la superficie terrestre es un factor importante para comprender el fenómeno de las islas de calor urbano, el cual refiere a aquellas áreas urbanas que experimentan temperaturas significativamente más altas que las zonas circundantes. Este aumento rige en factores como la concentración de edificios, falta de vegetación y la actividad humana. El calcular estas temperaturas permite identificar aquellas zonas de mayor afectación y los impactos en áreas como la salud y la calidad de vida de los habitantes.

Una de las principales funciones de la temperatura de la superficie terrestre es mantener un equilibrio en el ecosistema terrestre y garantizar la supervivencia de todas las formas de vida. Sin embargo, las temperaturas actualmente han presentado aumentos, la mayoría generadas por la actividad humana, lo que ha ocasionado cambios en el clima poniendo en riesgo tanto a especies como ecosistemas (tabla 4.4).

Tabla 4.4. Categorías de la Temperatura de la Superficie Terrestre

Descripción	Categoría	Color
Condición térmica ideal para una persona activa	< 18°C	
Grado de Temperatura estable, la población no está expuesta	18°C a 23°C	
Grado de temperatura moderada la población expuesta sufre bajos impactos de insolación.	23°C a 28°C	
La población expuesta sufre impactos moderados de insolación	28°C a 33°C	
La población expuesta sufre impactos graves de insolación y provoca más esfuerzo físico	33°C a 38°C	
La población expuesta sufre impactos muy graves ocasionando golpes de calor, el cuerpo tiene dificultad para regular su temperatura.	> 38°C	

Elaboración Propia Basado en Moya (2020).

Al comprender el comportamiento de estas temperaturas en diferentes áreas se puede diseñar e implementar intervenciones que ayuden a minimizar el efecto de isla de calor urbano, entre ellos la creación de espacios verdes, el uso de materiales de construcción reflejantes y por supuesto la mejora de la infraestructura urbana.

La LST es fundamental para entender y mitigar el cambio climático, gestionar las islas de calor en zonas urbanas y mejorar el uso de recursos en agricultura y agua. Además, permite proteger la biodiversidad y ecosistemas, evaluar riesgos naturales como incendios y sequías, y apoyar una planificación urbana sostenible (tabla 4.5).

Tabla 4.5. Particularidades de la Temperatura de la Superficie Terrestre

Característica	Descripción
<i>Variabilidad Geográfica</i>	La temperatura varía significativamente según la ubicación, influyendo factores como latitud, altitud y cercanía al mar.
<i>Influencia del clima</i>	Los patrones climáticos (tropical, templado, polar, etc.) determinan las temperaturas medias en diferentes regiones.
<i>Efecto Urbano</i>	Las áreas urbanas tienden a ser más cálidas que las rurales debido al fenómeno de isla de calor urbano, que resulta de la actividad humana y la modificación del paisaje.
<i>Ciclo Diario</i>	Las temperaturas fluctúan a lo largo del día, generalmente alcanzando su máximo durante la tarde y su mínimo durante la noche.
<i>Estacionalidad</i>	Las temperaturas cambian con las estaciones, siendo más altas en verano y más bajas en invierno, dependiendo de la región.
<i>Impacto de la Vegetación</i>	Las áreas con vegetación, como bosques y parques, suelen tener temperaturas más bajas en comparación con superficies desnudas o urbanizadas, debido a la evapotranspiración.

Asimismo, es relevante para la salud pública, ya que facilita la implementación de estrategias y medidas ante olas de calor. En conjunto ayuda en la toma de decisiones cuando se trata del desarrollo sostenible, adaptación climática y mejorar la calidad de vida.

A partir de las características mencionadas, se presentan los índices de temperatura correspondientes a los meses de enero, marzo, junio y noviembre, con el objetivo de analizar los cambios de temperatura en la superficie terrestre y entender su comportamiento en 2028 y 2022.

Enero 2018: Durante enero de 2018, la TST en Toluca mostró temperaturas promedio entre 18°C y 33°C, especialmente en el centro y norte de la ciudad, áreas con mayor densidad urbana e infraestructura.

Los valores por debajo de 18°C se concentraron en áreas periféricas, indicando condiciones térmicas óptimas para la población. En el centro, se observaron temperaturas en el rango de 18°C a 23°C, lo que representa condiciones térmicas relativamente estables y cómodas para los habitantes.

Sin embargo, las áreas con temperaturas superiores a 33°C se observaron principalmente en la zona industrial y en algunas partes del norte del municipio, donde la infraestructura y la actividad humana influyeron en el aumento de la temperatura.

Enero 2022: Para enero de 2022, hubo un aumento notable en la TST en la región norte de Toluca, donde se registraron temperaturas superiores a los 33°C, una expansión de las áreas con temperaturas elevadas en comparación con 2018 (figura 4.5). Las temperaturas por debajo de 18°C se desplazaron hacia localidades en el sur y en áreas con vegetación, mientras que las temperaturas entre 18°C y 23°C se dispersaron en diversas zonas del municipio.

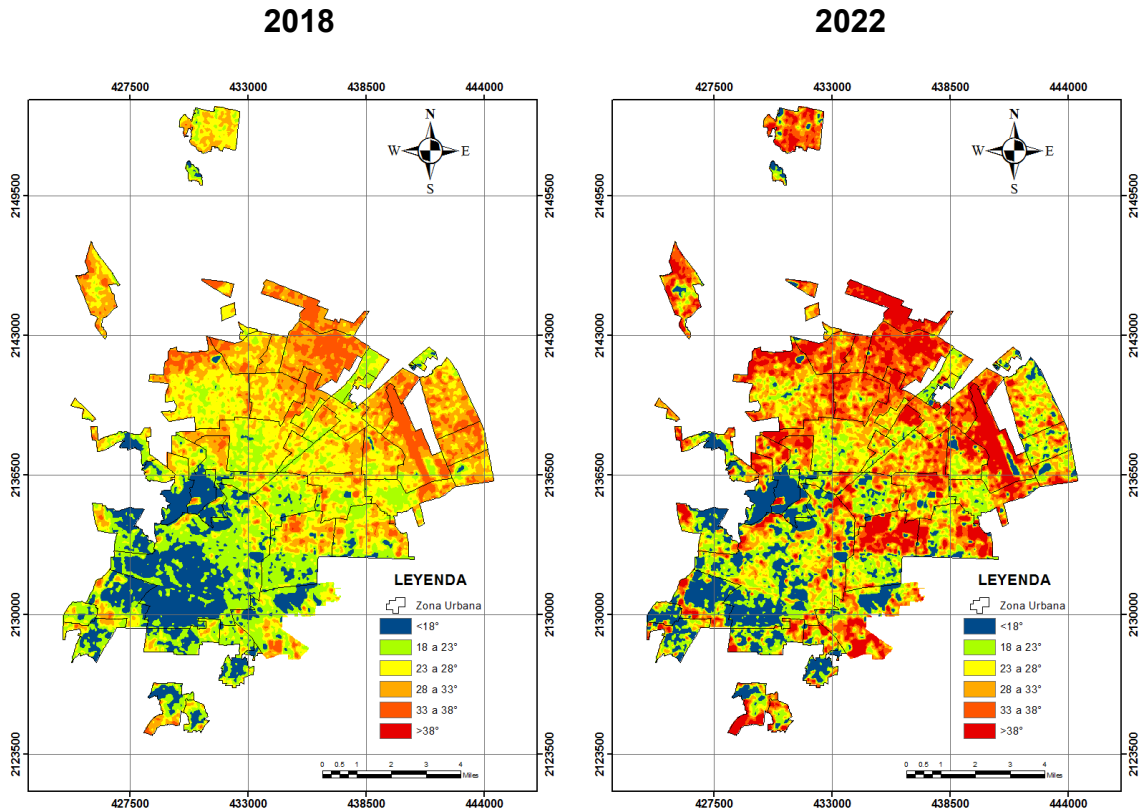


Figura 4.5. Temperatura de la Superficie Terrestre del mes de Enero

Las áreas con temperaturas por encima de 38°C aumentaron, concentrándose especialmente en áreas urbanas y en la periferia de la zona industrial. Este incremento en la TST en 2022 indica una mayor influencia de la actividad humana y la reducción de áreas verdes en la regulación de la temperatura.

Marzo 2018: En marzo de 2018, la distribución de temperaturas presentó valores menores a 18°C en el sur de Toluca, lo cual indicaba condiciones térmicas ideales. Las temperaturas entre 18°C y 23°C se concentraron principalmente en la zona central, donde la moderada densidad urbana permitió un ambiente térmico adecuado para la población. Sin embargo, las temperaturas entre 23°C y 33°C fueron más prevalentes en el norte y zonas industriales, influenciadas por la radiación solar y la estructura urbana que limita el enfriamiento de la superficie.

Marzo 2022: En marzo de 2022, las áreas con temperaturas entre 18°C y 23°C se distribuyeron hacia la periferia y algunas zonas céntricas, mientras que las temperaturas por encima de 33°C se mantuvieron similares a 2018 en cuanto a distribución, aunque se notó un incremento en áreas urbanas densamente pobladas. Las variaciones en la TST entre 2018 y 2022 (figura 4.6) en marzo

reflejan la influencia de factores urbanos y climáticos, como el aumento de la radiación y la expansión urbana que incrementaron el efecto de isla de calor en el municipio.

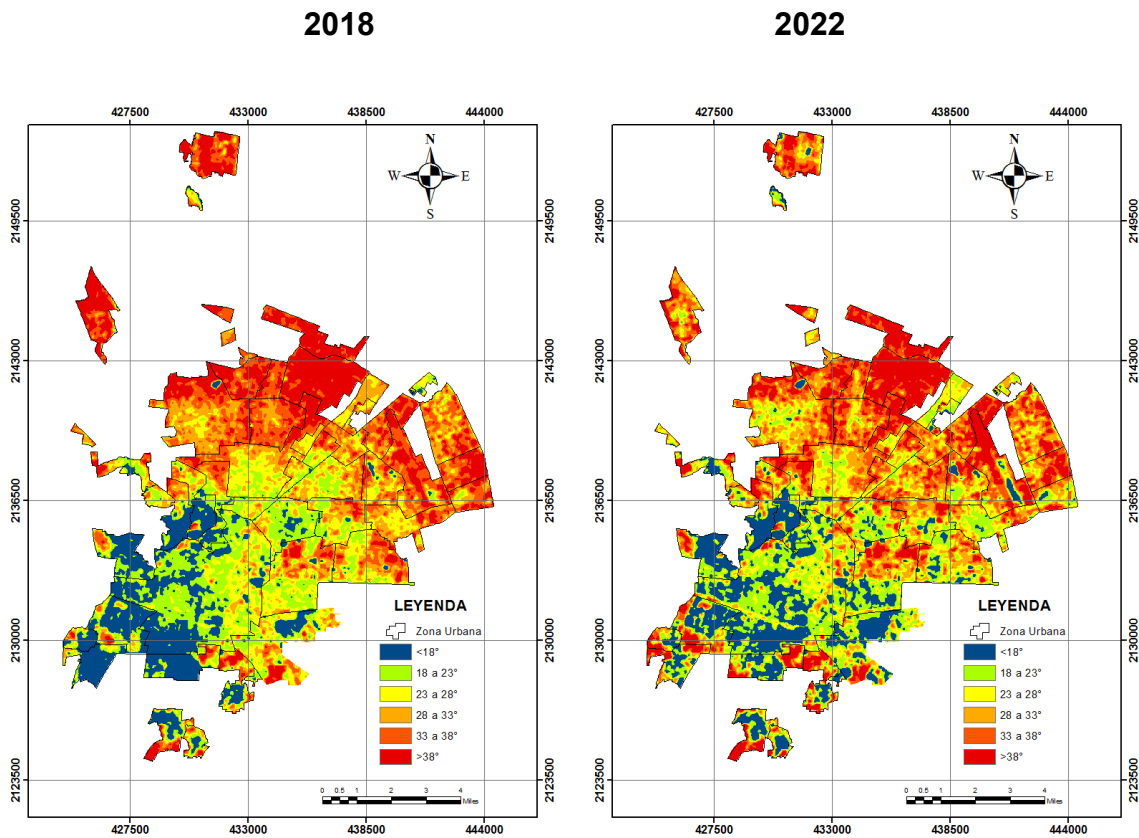


Figura 4.6. Temperatura de la Superficie Terrestre del mes de Marzo

Junio 2018: Junio de 2018 mostró un aumento significativo en la TST en el norte del municipio, con temperaturas entre 33°C y 38°C, especialmente en áreas con menor vegetación y una mayor densidad de edificios. Las áreas del centro y sur mantuvieron temperaturas entre 18°C y 28°C, lo cual es ideal para la población. Sin embargo, las zonas industriales y urbanas al norte experimentaron temperaturas por encima de 33°C debido al efecto de isla de calor, que es característico en esta época del año por la intensa radiación solar.

Junio 2022: En junio de 2022, las temperaturas más altas se desplazaron hacia el centro y noreste del municipio, con temperaturas entre 28°C y 38°C. Este cambio en la distribución de la TST sugiere que la actividad humana y la disminución de áreas verdes en el centro de Toluca impactaron directamente en el aumento de temperatura en esa área. La presencia de temperaturas elevadas en junio de 2022, en comparación con 2018 (figura 4.7), refleja un

incremento de la isla de calor en el municipio, donde las áreas urbanas continúan concentrando calor debido a la falta de cobertura vegetal y al uso de materiales que retienen calor.

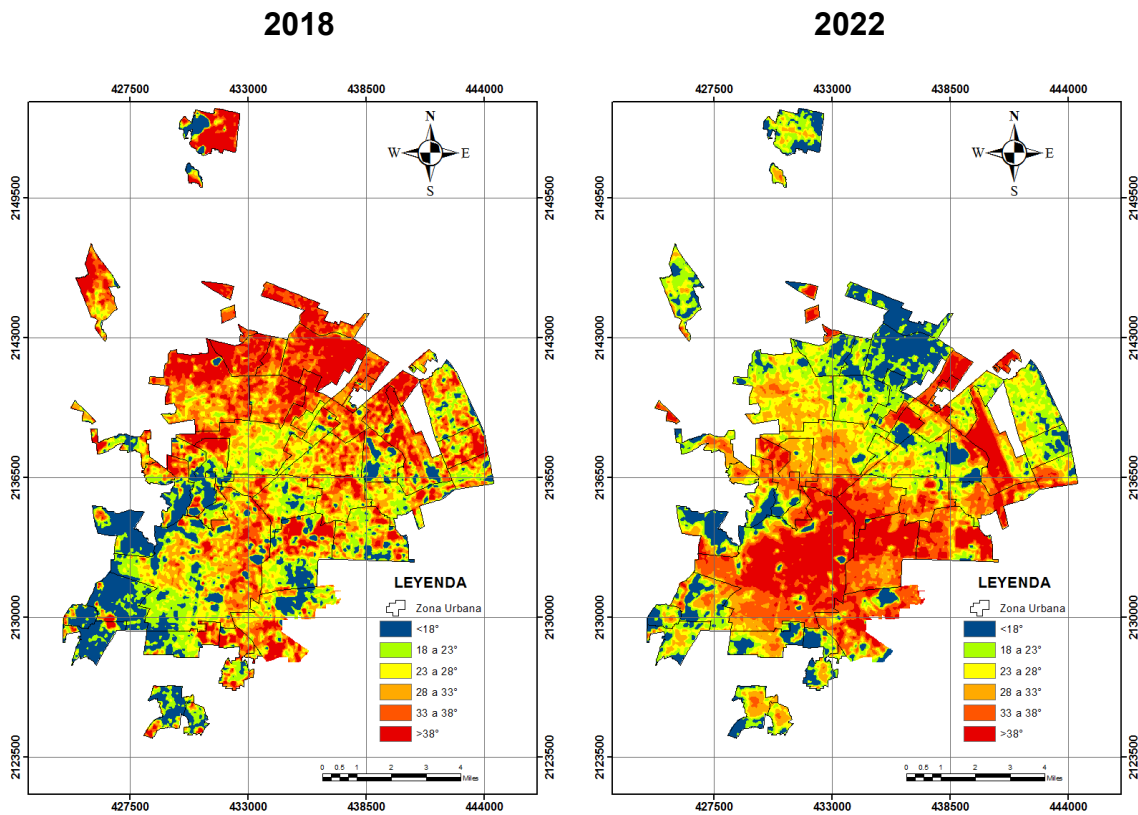


Figura 4.7. Temperatura de la Superficie Terrestre del mes de Junio.

Noviembre 2018: En noviembre de 2018, la TST presentó una distribución donde las temperaturas entre 18°C y 23°C se ubicaron en el norte y centro, mientras que las áreas del sur experimentaron temperaturas más bajas, menores a 18°C. Las áreas del norte y las zonas cercanas al aeropuerto presentaron temperaturas superiores a 28°C, debido a la mayor concentración de infraestructuras que retienen el calor. Este patrón refleja cómo la actividad urbana y la infraestructura influyen en la TST, incluso durante meses más frescos como noviembre.

Noviembre 2022: En noviembre de 2022, se observó una distribución similar en la TST, pero con una ligera expansión de las áreas con temperaturas entre 23°C y 33°C en el centro y norte del municipio. Las áreas con temperaturas superiores a 33°C en el norte se mantuvieron constantes, lo cual sugiere que, aunque el cambio en la TST fue mínimo en comparación con 2018 (figura 4.8), la distribución de calor en noviembre de 2022 estuvo más relacionada con la infraestructura

urbana y menos con factores climáticos naturales. Esto implica que la actividad humana, especialmente en zonas industriales y urbanas densas, sigue impactando en la temperatura de superficie en el municipio.

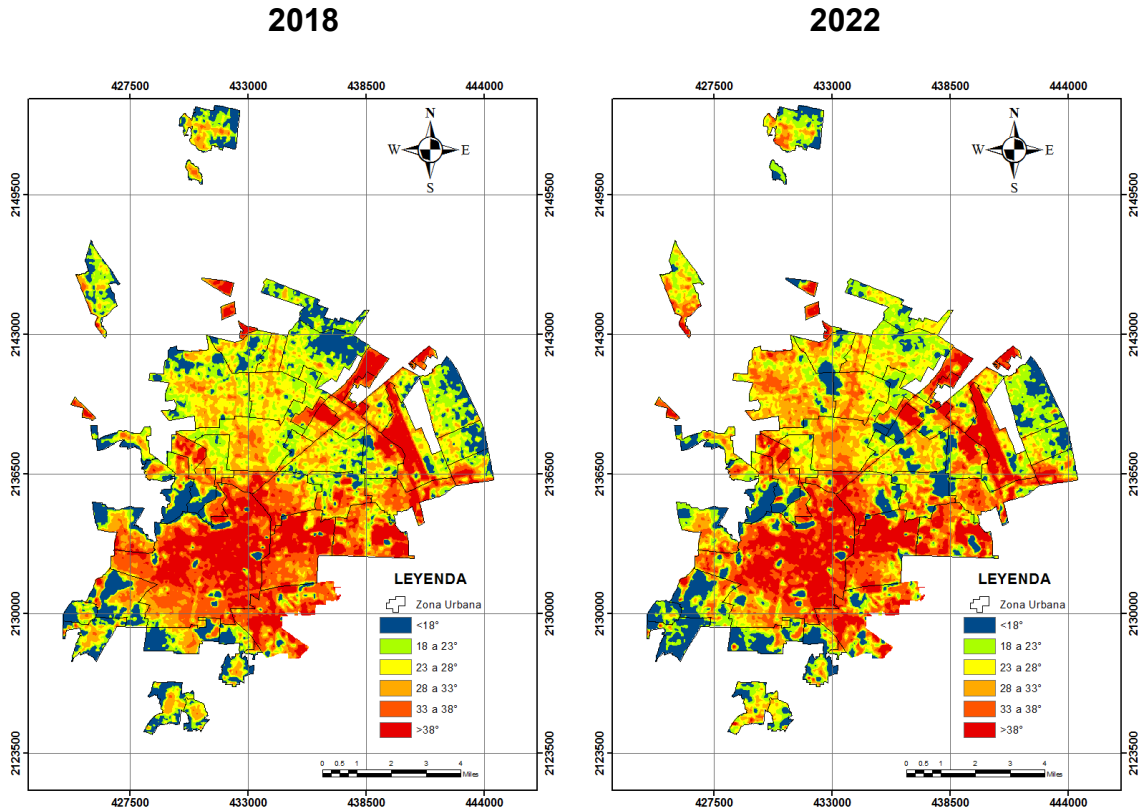


Figura 4.8. Temperatura de la Superficie Terrestre del mes de Noviembre

Categorías generales

Conocer los cambios de temperatura en Toluca y en cualquier lugar nos ayuda en la organización y toma de decisiones en ámbitos como la agricultura, la salud pública, la planificación urbana y gestión de recursos energéticos.

Al entender estos patrones de temperatura se pueden implementar medidas de mitigación ante los efectos de estos cambios y llevar a cabo estrategias de adaptación climática.

Para el mes de enero y marzo las altas temperaturas se localizan en la zona norte del municipio, esto se debe a que ambos periodos reciben una radiación solar más directa

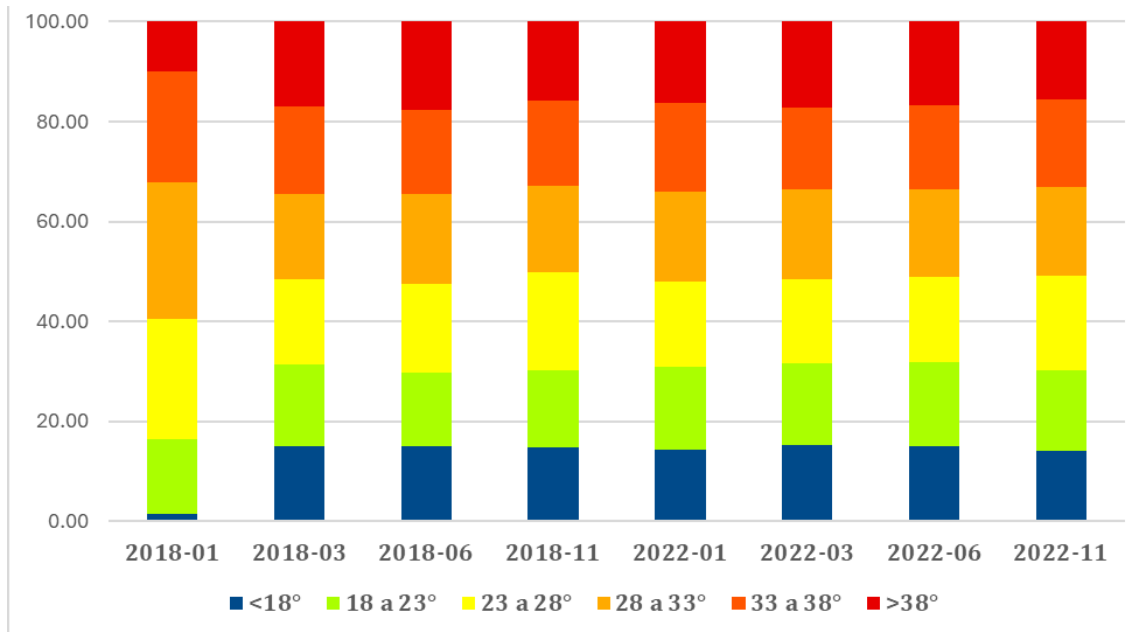
por la posición del sol y los vientos locales suelen cambiar de dirección llevando el calor hacia las periferias haciendo que este se extienda más fácilmente, causando una concentración de temperaturas.

Los meses de junio y noviembre se comportan diferente, las altas temperaturas están en la zona céntrica del municipio por la radiación directa del sol en esos periodos, la actividad humana, contener menos espacios verdes que mitigan la temperatura y la limitada circulación del aire por las edificaciones (gráfica 4.2).

Tabla 4.6. Porcentaje de superficie por categoría de la Temperatura de la Superficie Terrestre

<i>Fecha</i>	< 18 °C	18 °C – 23 °C	23 °C – 28 °C	28 °C – 33 °C	33 °C – 38 °C	> 38 °C
2018-01	1.45	14.85	24.28	27.23	22.23	9.96
2018-03	14.93	16.46	17.03	17.14	17.42	17.03
2018-06	15.04	14.62	17.75	18.13	16.86	17.60
2018-11	14.70	15.60	19.58	17.29	16.96	15.88
2022-01	14.28	16.60	17.03	18.03	17.80	16.24
2022-03	15.34	16.20	16.90	18.01	16.25	17.30
2022-06	15.06	16.81	17.05	17.45	16.82	16.80
2022-11	13.99	16.25	18.97	17.68	17.48	15.62

Gráfica 4.2. Comportamiento General de la Temperatura de la Superficie Terrestre









Los cambios de temperatura juegan un papel importante en la vida cotidiana porque afecta la salud, las actividades diarias, la comodidad y sobre todo en la disponibilidad de los recursos naturales.

4.3. ÍNDICE DE CALOR URBANO

El índice de calor urbano (ICU) es utilizado para calcular la sensación térmica, además de tener en cuenta el efecto de la urbanización en la modificación del clima debido a que las ciudades con sus edificios, calles y espacios pavimentados generan un microclima que aumenta considerablemente la sensación de calor.

Estudiar el índice de calor urbano favorece el desarrollo de estrategias de mitigación al identificar áreas propensas a experimentar temperaturas extremas. Su importancia radica en la capacidad de alertar sobre riesgos relacionados a las olas de calor, deshidratación, golpes de calor entre otros, por ello es importante conocer las características de las diferencias en para evaluar el impacto en la población (tabla 4.7).

Tabla 4.7. Categorías del Índice de Calor Urbano basado en Stewart y Oke (2012).

Descripción	Diferencia	Color
Las zonas urbanas tienen un efecto mínimo o nulo de isla de calor, lo que indica que la vegetación y el uso adecuado del suelo contribuyen a un clima similar al de áreas no urbanizadas.	0°C a 1°C	
El efecto de la isla de calor es bajo, y aunque hay un ligero incremento en la temperatura urbana, no representa un estrés térmico considerable.	1°C a 2°C	
La diferencia de temperatura es perceptible y puede causar un incremento leve en el estrés térmico en áreas urbanas. Se da en zonas donde hay construcciones y pavimento, pero también existen zonas verdes.	2°C a 4°C	
La temperatura es significativamente más alta que en áreas rurales, lo que genera un nivel moderado de estrés térmico. Esta categoría es común en ciudades de tamaño medio con una cobertura vegetal limitada y una alta densidad de edificios.	2°C a 6°C	
Las áreas urbanas experimentan un calor elevado. Este rango es común en grandes ciudades densamente urbanizadas, con poca vegetación y una gran superficie de pavimento y edificios.	6°C a 8°C	
La intensidad de la isla de calor es extremadamente alta. Las zonas urbanas con esta diferencia de temperatura tienen un estrés térmico intenso, lo cual representa riesgos para la salud pública y aumenta la demanda de energía para enfriamiento.	> 8°C	

El índice de calor urbano es una herramienta crítica que ayuda a identificar, analizar y mitigar los efectos del calor extremo en las ciudades. Contribuye a mejorar la salud pública, optimizar el uso energético, guiar la planificación urbana y aumentar la resiliencia climática. Ante el desafío global del cambio climático, su uso es esencial para la creación de entornos urbanos sostenibles y habitables.

Enero 2018: El Índice de Calor Urbano indica que las temperaturas experimentadas en Toluca presentan un riesgo moderado de estrés térmico. Durante este mes, los valores del ICU se encuentran en un rango que oscila entre 3 y 7 grados centígrados por encima de las temperaturas de áreas no urbanizadas, lo que sugiere un impacto notorio de la urbanización en el aumento de la temperatura.

En esta temporada invernal, aunque las temperaturas en general son más bajas, el efecto de la isla de calor urbano mantiene temperaturas elevadas en comparación con zonas rurales cercanas. Esto se debe principalmente a la reducción de la vegetación y al predominio de superficies pavimentadas y edificios, que generan un microclima más cálido en áreas densamente pobladas.

Enero 2022: El ICU muestra una disminución en los valores máximos en comparación con 2018 (figura 4.9), situándose en un rango de 0 a 3 grados centígrados. Esto sugiere una reducción en el riesgo de estrés térmico, que se considera bajo para este año. La dispersión de este rango más bajo indica que el impacto del calor, aunque presente, se distribuye de forma más uniforme en toda la ciudad. Esta reducción en el índice puede estar asociada a posibles medidas de mitigación o al cambio en patrones de urbanización, como la incorporación de áreas verdes y la modificación de materiales de construcción con mayor capacidad reflectiva. Sin embargo, el efecto de la urbanización sigue siendo relevante en este mes, ya que las áreas pavimentadas continúan aumentando la sensación térmica en relación con las áreas rurales.

Marzo 2018: Durante marzo de 2018, el ICU se mantiene en niveles de riesgo bajo, con valores entre 0 a 3 y 3 a 7 grados centígrados. Este mes refleja una ligera variación en la distribución del calor, lo cual es característico de la estación de inicio de primavera, cuando la radiación solar comienza a ser más intensa pero no alcanza niveles críticos.

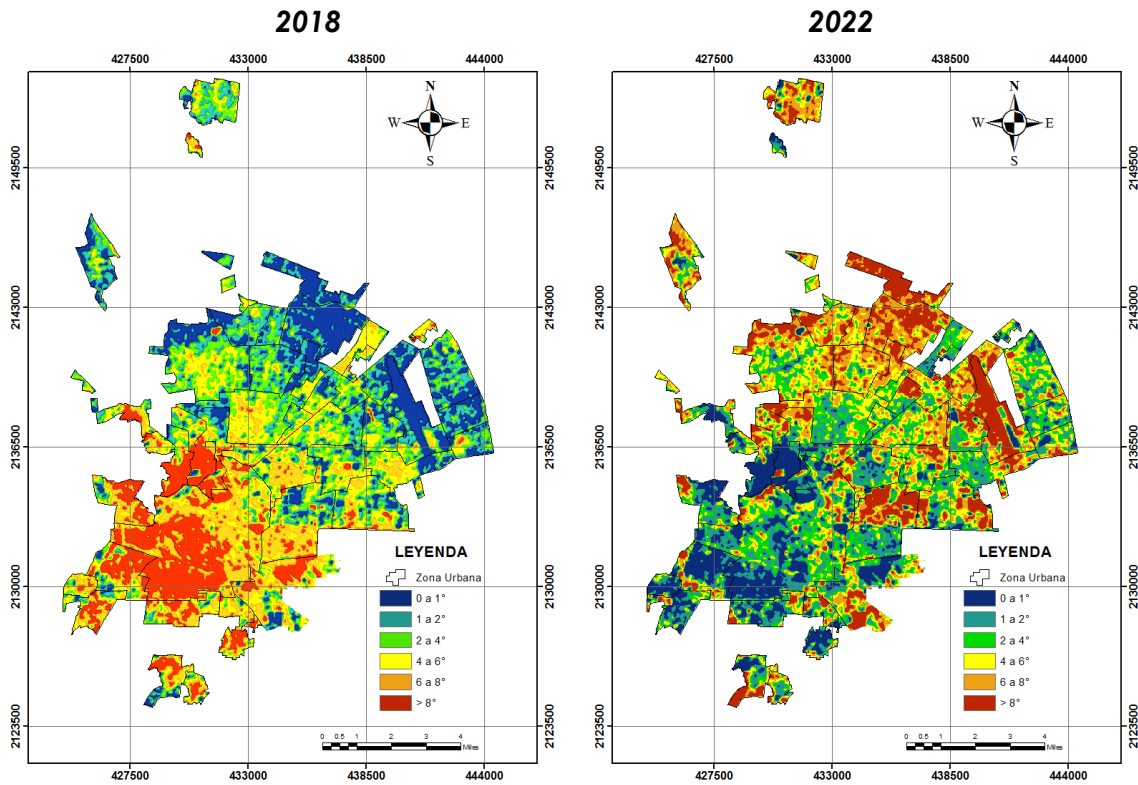


Figura 4.9. Índice de Calor Urbano Enero

En comparación con enero, se observa un aumento en la radiación solar, lo que incrementa la temperatura en áreas urbanas en mayor proporción que en las rurales debido a los materiales que absorben y retienen el calor en la ciudad. A pesar de que el riesgo de estrés térmico es bajo, la estabilidad del ICU en este mes muestra cómo las áreas urbanas mantienen temperaturas elevadas en comparación con zonas rurales, indicando una adaptación térmica limitada del espacio urbano en este periodo.

Marzo 2022: Para marzo de 2022, el ICU muestra valores similares a los de 2018 (figura 4.10), manteniendo el rango de riesgo bajo entre 0 a 3 y 3 a 7 grados centígrados. Aunque no se observan cambios significativos en el índice respecto al mismo mes de 2018, la distribución del calor se percibe con menor variación en algunas áreas de la ciudad, lo cual sugiere cierta estabilidad térmica urbana en comparación con los años anteriores. Esta estabilidad no significa que el riesgo de estrés térmico haya desaparecido, ya que las características urbanas, como pavimentos y edificios, continúan contribuyendo al calor retenido en comparación con áreas menos urbanizadas. La consistencia en el rango sugiere que las medidas de mitigación no han

sido implementadas de forma uniforme en toda la ciudad o que las condiciones de urbanización siguen sin cambiar considerablemente.

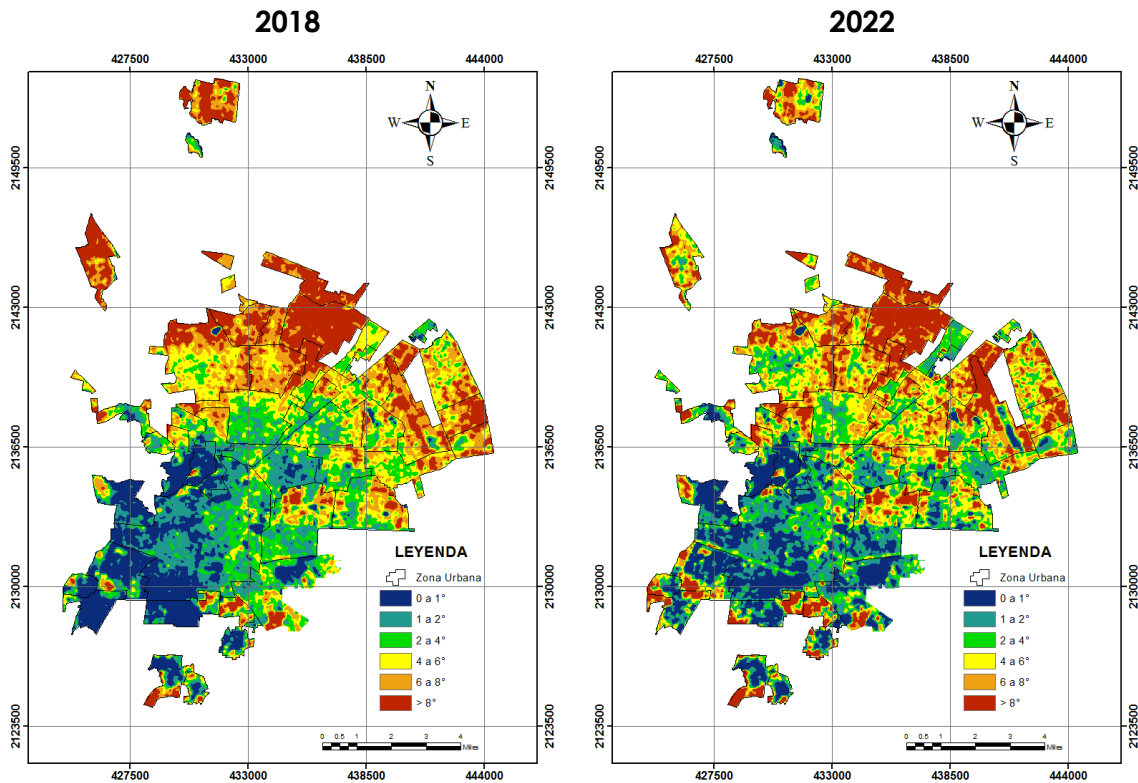


Figura 4.10. Índice de Calor Urbano Marzo

Junio 2018: En junio de 2018, el ICU registra valores en el rango de 0 a 3 grados centígrados, lo que representa un riesgo bajo de estrés térmico. Este comportamiento es característico del verano, donde el aumento de la radiación solar eleva significativamente las temperaturas en el entorno urbano. Las áreas urbanas, compuestas por superficies de concreto y asfalto, retienen el calor durante el día y lo liberan lentamente durante la noche, generando un ambiente más cálido que en zonas rurales.

En este mes, la vegetación juega un papel importante, y la falta de espacios verdes en algunas zonas urbanas aumenta la sensación de calor. Sin embargo, el riesgo de estrés térmico se mantiene bajo debido a que las temperaturas urbanas no alcanzan niveles críticos en comparación con otras ciudades con densidad urbana mayor.

Junio 2022: Para junio de 2022, el ICU indica una disminución en los valores de riesgo alto y una distribución más uniforme en los rangos de riesgo bajo, manteniéndose entre 0 a 3 grados centígrados (figura 4.11). Este cambio sugiere una posible respuesta positiva a medidas de mitigación, como el incremento de áreas verdes o el uso de materiales de construcción que reflejan más la radiación solar. A pesar de esto, el calor urbano sigue siendo más elevado que en zonas rurales, aunque en general las temperaturas no alcanzan niveles críticos. La tendencia a disminuir el riesgo de estrés térmico en verano refleja que los cambios en la planificación urbana podrían estar teniendo un efecto en la reducción del calor urbano en ciertas áreas de Toluca.

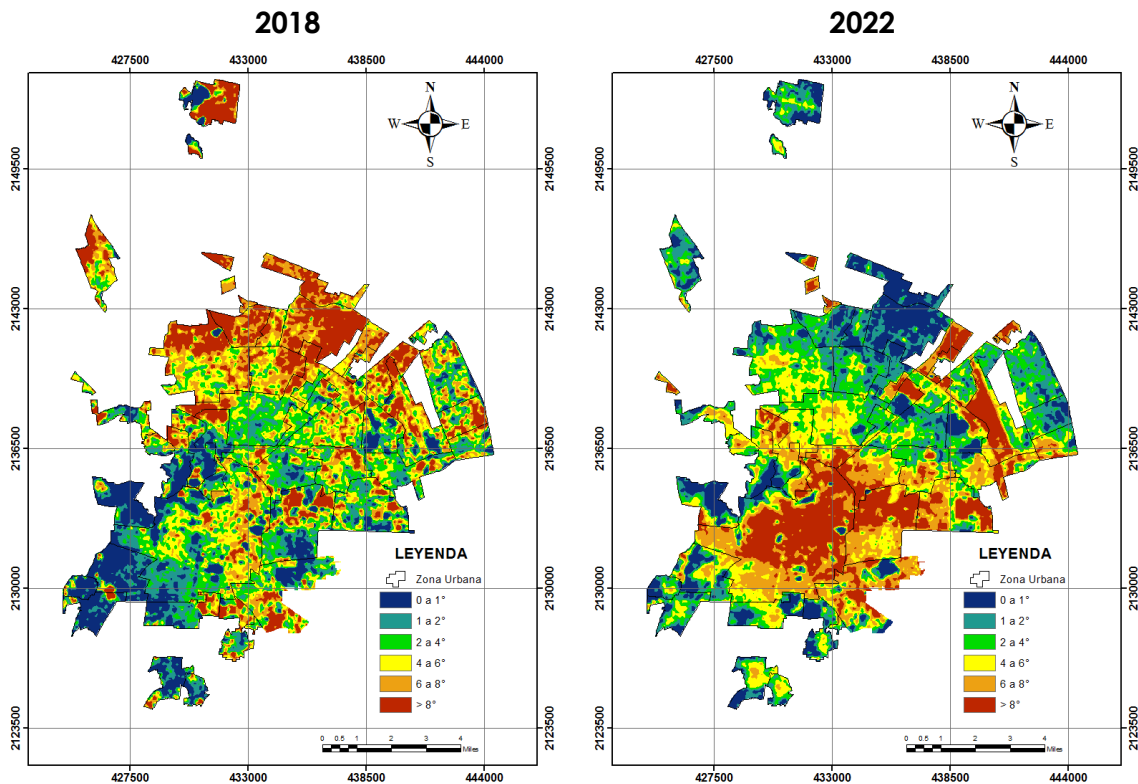


Figura 4.11. Índice de Calor Urbano Junio

Noviembre 2018: En noviembre de 2018, el ICU presenta una disminución en los valores en comparación con los meses anteriores, situándose en el rango de 0 a 3 grados centígrados. Este comportamiento es característico de la transición hacia el otoño, cuando la radiación solar disminuye y, con ello, el impacto del calor en las áreas urbanas. Sin embargo, aunque las temperaturas generales descienden, la configuración urbana

aún provoca que las zonas con alta densidad de edificios y pavimentos retengan calor durante el día.

Este patrón sugiere que el microclima urbano mantiene una temperatura superior a la de áreas rurales, aunque el efecto de la isla de calor urbano es menos intenso debido a la menor radiación solar en esta temporada.

Noviembre 2022: En noviembre de 2022, los valores del ICU se mantienen en el mismo rango de 0 a 3 grados centígrados, aunque con una ligera disminución en comparación con 2018 (figura 4.12).

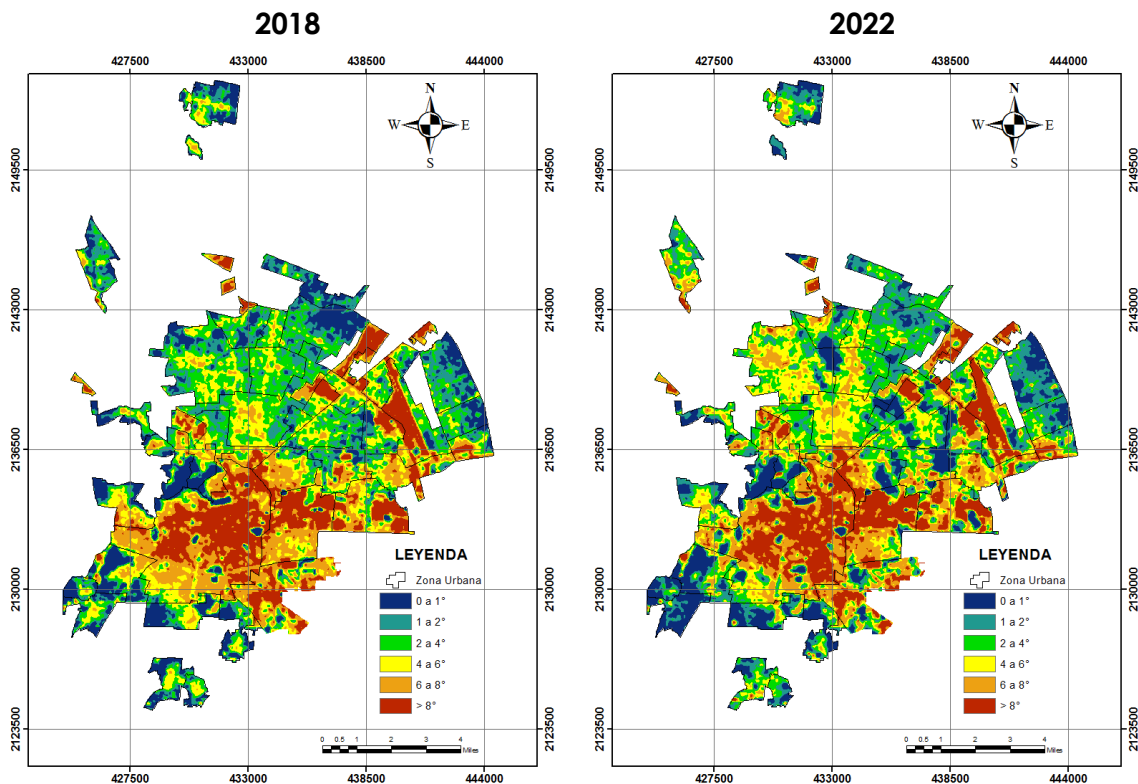


Figura 4.12. Índice de Calor Urbano Noviembre.

Esta reducción puede atribuirse a la menor radiación solar y al posible efecto de medidas de mitigación implementadas en áreas específicas de Toluca. No obstante, la presencia de calor urbano en esta época del año indica que el diseño de la ciudad, caracterizado por materiales que retienen calor y una cantidad limitada de vegetación, sigue

representando un desafío. La transición otoñal mitiga de manera natural el estrés térmico en comparación con los meses de verano, aunque el efecto de la isla de calor urbano persiste.

Categorías generales

Aun así, la continua presencia de un índice de calor en estas zonas urbanas reflejan que el diseño de la ciudad, con sus materiales que retienen calor y la falta de vegetación suficiente, sigue siendo un desafío importante.

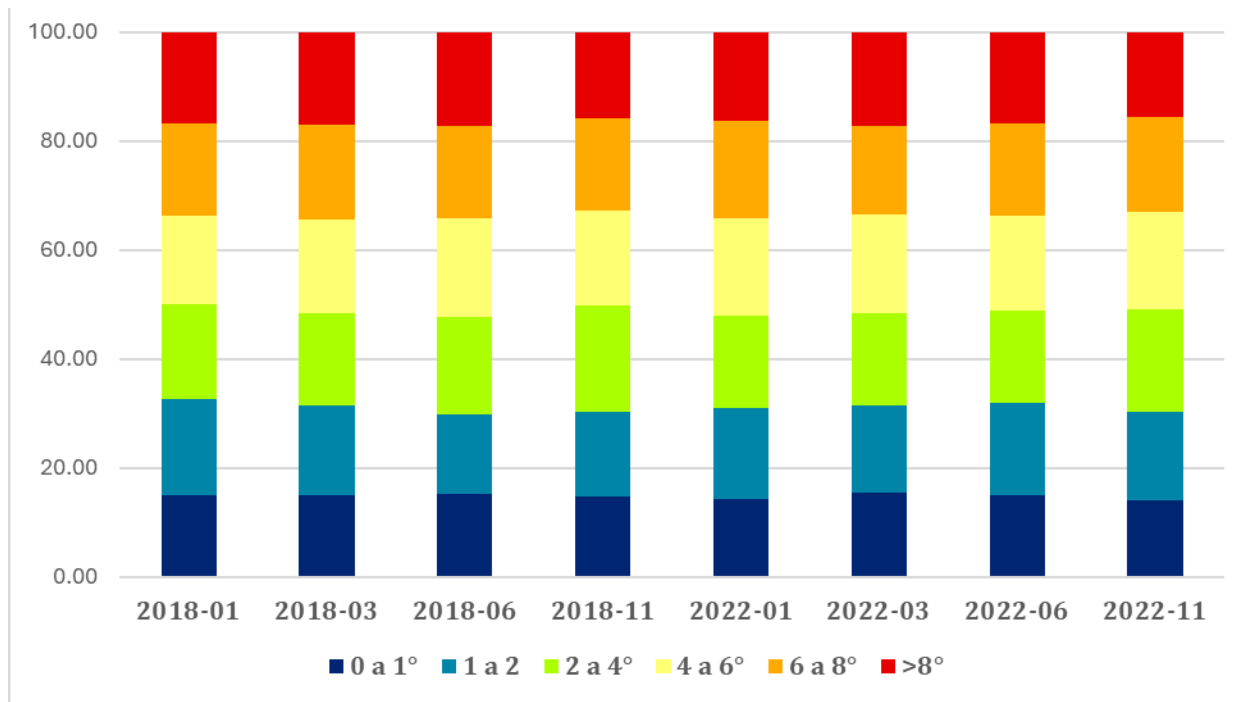
El uso del suelo y la urbanización son factores clave que influyen en el comportamiento del índice de calor urbano en Toluca. La transformación de áreas verdes o rurales en zonas urbanas aumenta la presencia de materiales impermeables, como el concreto y el asfalto, que absorben y retienen más calor.

La disminución de la vegetación no solo reduce la sombra disponible, sino que también altera la humedad del suelo, lo que reduce la evaporación, un proceso natural que ayuda a enfriar el ambiente. En Toluca, se ha observado que la deforestación y la urbanización sin planificación adecuada contribuyen al aumento de la temperatura en ciertas áreas, lo que agrava el problema del calor urbano (Tabla 4.3).

Tabla 4.8. Porcentaje de superficie de las diferencias del índice de calor urbano.

Fecha	0 a 1°	1 a 2°	2 a 4°	4 a 6°	6 a 8°	>8°
2018-01	14.96	17.77	17.42	16.15	16.90	16.81
2018-03	14.92	16.46	17.03	17.14	17.42	17.03
2018-06	15.12	14.70	17.84	18.23	16.82	17.29
2018-11	14.70	15.59	19.58	17.29	16.97	15.88
2022-01	14.28	16.60	17.03	18.03	17.80	16.28
2022-03	15.34	16.20	16.90	18.01	16.25	17.30
2022-06	15.06	16.81	17.05	17.45	16.82	16.80
2022-11	13.99	16.25	18.97	17.68	17.48	15.62

Gráfica 4.3. Porcentaje de diferencia por categoría del índice de calor urbano.



Aun así, la continua presencia de un índice de calor en estas zonas urbanas reflejan que el diseño de la ciudad, con sus materiales que retienen calor y la falta de vegetación suficiente, sigue siendo un desafío importante.

El uso del suelo y la urbanización son factores clave que influyen en el comportamiento del índice de calor urbano en Toluca. La transformación de áreas verdes o rurales en zonas urbanas aumenta la presencia de materiales impermeables, como el concreto y el asfalto, que absorben y retienen más calor.

La disminución de la vegetación no solo reduce la sombra disponible, sino que también altera la humedad del suelo, lo que reduce la evaporación, un proceso natural que ayuda a enfriar el ambiente. En Toluca, se ha observado que la deforestación y la urbanización sin planificación adecuada contribuyen al aumento de la temperatura en ciertas áreas, lo que agrava el problema del calor urbano.

4.4. MITIGACIÓN Y PLANIFICACIÓN FUTURA

El fenómeno de la Isla de Calor Urbano en la ciudad de Toluca destaca la necesidad de adoptar estrategias de mitigación y una planificación urbana sostenible para reducir sus efectos en la salud de los habitantes, el consumo energético y el medio ambiente. Las altas temperaturas resultantes de la urbanización intensiva y la pérdida de vegetación en la ciudad exigen una intervención activa que contemple múltiples frentes de acción para reducir los impactos del calor urbano.

La vegetación actúa como elemento fundamental en la regulación de las temperaturas urbanas. Los árboles y áreas verdes, al generar sombra y propiciar la evapotranspiración, ayudan a enfriar el ambiente de manera natural. En Toluca, una de las estrategias de mitigación más efectivas consiste en incrementar la cantidad de espacios verdes en el entorno urbano.

La creación de parques, jardines verticales y techos verdes en edificios contribuiría no solo a reducir la temperatura local, sino también a mejorar la calidad del aire y a proporcionar espacios recreativos para la población. Estas áreas verdes pueden amortiguar las elevadas temperaturas del verano y contribuir a una percepción de confort térmico en la población.

Las superficies urbanas, como techos y pavimentos, contribuyen de manera significativa a la retención de calor debido a sus propiedades de baja reflectividad (albedo). Para mitigar el efecto de calor, es recomendable el uso de materiales de construcción que reflejen más radiación solar y retengan menos calor, tales como pavimentos fríos y techos reflectantes.

Estos materiales pueden reducir la absorción de calor en las construcciones, disminuyendo así la temperatura superficial en áreas urbanas densamente edificadas. Además, la implementación de techos verdes o blancos en edificios contribuiría a una menor acumulación de calor durante el día.

Una planificación urbana adecuada, que priorice el diseño y la zonificación inteligente, resulta esencial para mitigar el efecto de la ICU. La creación de zonas de

amortiguamiento con vegetación alrededor de áreas de alta densidad de edificaciones podría reducir el impacto del calor en estas áreas.

Además, la promoción de prácticas de edificación sustentable mediante incentivos fiscales o reglamentaciones podría incentivar el desarrollo de construcciones con criterios de eficiencia energética y menor impacto térmico.

El tráfico vehicular y el uso de combustibles fósiles en el transporte contribuyen significativamente a la generación de calor en el ambiente urbano. La adopción de políticas que promuevan el uso de transporte público, bicicletas y movilidad peatonal, así como la introducción de vehículos eléctricos, puede reducir las emisiones y la temperatura generada por el tráfico.

Las zonas de tráfico restringido y el aumento de infraestructura para transporte sostenible son medidas que pueden contribuir a una reducción en el efecto de la ICU en Toluca.

El uso de tecnologías avanzadas, como imágenes satelitales y sensores de temperatura, facilita el monitoreo continuo de la ICU. Implementar un sistema de monitoreo en tiempo real permitiría a las autoridades locales evaluar el impacto de las políticas de mitigación y ajustar las estrategias de forma dinámica.

Este monitoreo también permitiría alertar a la población en caso de aumentos de temperatura extremos y adoptar medidas preventivas para proteger la salud de los habitantes.

La participación ciudadana es clave para el éxito de las estrategias de mitigación. Involucrar a la comunidad en la creación y mantenimiento de áreas verdes, así como en la reducción de prácticas que contribuyen al calentamiento urbano, fortalecerá los esfuerzos de mitigación.

A través de campañas de concienciación sobre el efecto de la ICU y la importancia de cuidar el medio ambiente, es posible incentivar prácticas sostenibles en el día a día de los habitantes.

CONCLUSIONES

El análisis del fenómeno de la Isla de Calor Urbano en Toluca entre los años 2018 y 2022 revela importantes conclusiones que resaltan tanto los efectos de la urbanización como las áreas de oportunidad para mejorar el clima urbano. La comparación de los datos de ambos años muestra que, aunque se observan ciertos avances en la reducción de la intensidad de la ICU en algunas zonas, el problema persiste y se sigue expandiendo a medida que crece la ciudad. A continuación, se presentan las principales conclusiones derivadas de este estudio.

El proceso de urbanización en Toluca, caracterizado por la construcción de edificios, pavimentos y la pérdida de vegetación, ha generado un aumento en la temperatura de la ciudad en comparación con sus áreas rurales. Las superficies impermeables y los materiales de construcción utilizados absorben y retienen el calor, lo que contribuye a un microclima urbano significativamente más cálido.

Este estudio confirma que las áreas de alta densidad de edificaciones presentan mayores temperaturas y requieren intervenciones específicas para reducir su contribución a la ICU.

La vegetación desempeña un papel clave en la reducción de la temperatura y en la mejora de la calidad del aire urbano. La disminución de espacios verdes en Toluca ha limitado la capacidad de la ciudad para regular sus temperaturas de forma natural, lo cual subraya la necesidad de implementar políticas que incentiven la creación y conservación de áreas verdes.

Además, se ha comprobado que las zonas con mayor vegetación experimentan menos efectos de la ICU, lo que valida la efectividad de la infraestructura verde como estrategia de mitigación.

Este estudio demuestra que la infraestructura urbana tiene un rol determinante en la formación de la ICU. La utilización de materiales reflectantes en techos y pavimentos, junto con el diseño de techos verdes, puede reducir la absorción de calor en las construcciones.

Sin embargo, la implementación de estos materiales y tecnologías en Toluca sigue siendo limitada. Se concluye que la promoción de una infraestructura urbana sostenible es fundamental para mitigar los efectos del calor urbano en la ciudad.

Las tendencias de calentamiento global agravan el problema de la ICU, intensificando los períodos de altas temperaturas en áreas urbanas. En Toluca, la combinación del cambio climático con el aumento de la densidad urbana crea condiciones que incrementan la frecuencia e intensidad de las olas de calor. La planificación urbana debe tener en cuenta este factor y anticiparse a los posibles escenarios futuros, considerando estrategias de resiliencia climática.

Este análisis destaca la necesidad de una planificación urbana adaptativa que responda a los desafíos del fenómeno de la ICU. La zonificación inteligente, la limitación de la densidad de edificaciones en áreas vulnerables al calor y el incentivo para adoptar prácticas de construcción sostenibles son componentes clave para lograr una ciudad más resiliente. Un enfoque de planificación integral, que contemple tanto las necesidades de crecimiento como los efectos ambientales, será crucial para el desarrollo sostenible de Toluca.

La implementación de medidas para reducir la ICU no será completamente efectiva sin el compromiso y la colaboración de la comunidad. Las campañas de sensibilización sobre los efectos del calor urbano, junto con la educación en prácticas de ahorro energético y sostenibilidad, pueden motivar a los ciudadanos a participar activamente en la creación de un ambiente urbano más fresco y saludable.

En resumen, el estudio de la ICU en Toluca pone de manifiesto la necesidad urgente de adoptar estrategias de mitigación sostenibles y de realizar una planificación urbana orientada a la resiliencia. A medida que la ciudad continúa creciendo, el compromiso de las autoridades y la participación de la comunidad serán fundamentales para crear un ambiente urbano habitable y adaptado a los desafíos del cambio climático.

RECOMENDACIONES

Las islas de calor urbanas (ICU) representan un fenómeno climático que afecta a las áreas urbanas, donde las temperaturas son significativamente más altas en comparación con las zonas rurales circundantes. Este efecto es causado por factores como la densidad de edificaciones, la reducción de áreas verdes y el uso de materiales que absorben y retienen el calor. Las ICU no solo agravan los efectos del cambio climático, sino que también impactan negativamente en la salud pública, el consumo energético y la calidad de vida de las personas que habitan en las ciudades.

Para contrarrestar este fenómeno, es fundamental implementar estrategias que reduzcan las temperaturas urbanas y promuevan un desarrollo sostenible. Entre estas medidas destacan el aumento de áreas verdes, la mejora en el diseño urbano, el uso de materiales de construcción innovadores, la promoción de políticas públicas responsables y el fomento de tecnologías sostenibles.

Cada una de estas recomendaciones ofrece soluciones prácticas para mitigar el impacto de las ICU, ayudando no solo a disminuir las temperaturas, sino también a mejorar el confort térmico, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y crear entornos urbanos más saludables y resilientes.

Estas estrategias requieren la colaboración de gobiernos, comunidades, empresas y expertos en urbanismo para integrarse de manera efectiva en las ciudades. A continuación, se detallan las principales recomendaciones para abordar este desafío ambiental.

Recomendación	Estrategia
Aumento de las áreas verdes	<p>Plantar árboles: Los árboles proporcionan sombra y reducen la temperatura a través de la evapotranspiración.</p> <p>Techos y paredes verdes: Cubrir edificios con vegetación reduce la absorción de calor y mejora la eficiencia energética.</p> <p>Parques urbanos: Ampliar y mantener áreas verdes accesibles en las ciudades.</p>
Mejorar el diseño urbano	<p>Calles arboladas: Incorporar árboles en avenidas y calles para disminuir el calor a nivel del suelo.</p> <p>Espacios abiertos: Diseñar plazas y zonas abiertas que favorezcan la ventilación natural.</p> <p>Zonas de agua: Fuentes, estanques y cuerpos de agua ayudan a enfriar el ambiente.</p>
Materiales de construcción adecuados	<p>Pavimentos fríos: Utilizar materiales reflectantes o permeables que reduzcan la absorción de calor.</p> <p>Techos fríos: Aplicar recubrimientos reflectantes o usar materiales de colores claros en techos para disminuir el calor absorbido.</p> <p>Materiales de baja conductividad térmica: Construir con materiales que minimicen la transferencia de calor hacia los interiores.</p>
Políticas Públicas	<p>Regulaciones urbanísticas: Establecer normas que promuevan techos verdes, pavimentos fríos y la incorporación de vegetación en nuevos desarrollos.</p> <p>Incentivos fiscales: Ofrecer beneficios a desarrolladores y propietarios que adopten prácticas sostenibles.</p> <p>Sensibilización comunitaria: Educar a la población sobre los efectos de las ICU y cómo contribuir a su mitigación.</p>
Promover tecnologías sostenibles	<p>Energía renovable: Fomentar el uso de energía solar, eólica y otras fuentes renovables para reducir la dependencia de combustibles fósiles.</p> <p>Iluminación eficiente: Implementar sistemas de iluminación LED que generen menos calor y consuman menos energía.</p> <p>Infraestructura inteligente: Sistemas que monitoreen las condiciones climáticas y ajusten los recursos urbanos en tiempo real.</p>
Mejora de la movilidad	<p>Reducción del uso del automóvil: Fomentar el transporte público, el uso de bicicletas y caminar para disminuir las emisiones de calor.</p> <p>Sistemas de transporte eléctrico: Implementar autobuses y trenes eléctricos que generen menos calor que los vehículos tradicionales.</p>

REFERENCIAS

¿Qué es ArcGIS? | ArcGIS Resource Center. (s. f.). <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>

Administración. (2015). Isla de calor urbana. Arquitectura y Energía. <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/isla-de-calor-urbana/>

Alonso, D. (2023). Qué podemos hacer con QGIS en el campo de la Teledetección. MappingGIS. <https://mappinggis.com/2017/10/que-podemos-hacer-con-qgis-en-el-campo-de-la-teledeteccion/>

Alonso, D. (2023a, enero 30). Los 6 Índices de Vegetación para completar el NDVI. MappingGIS. <https://mappinggis.com/2020/07/los-6-indices-de-vegetacion-para-completar-el-ndvi>

Análisis de la isla de calor urbana: Nuevos métodos y tecnologías. (s. f.). <https://www.iingen.unam.mx/es-mx/AlmacenDigital/Gaceta/Gaceta-enero-febrero-2022/Paginas/analisis-isla-calor-urbana.aspx>

Andrades y Múñez, M. C. (2012). FUNDAMENTOS DE LA CLIMATOLOGÍA. Servicio de Publicaciones, 12(Serie 551.58). <https://dialnet.unirioja.es/descarga/libro/267903.pdf>

Antogarpe. (2022). ¿Qué es la emisividad y por qué es tan importante en Termografía? Mesurex. <https://mesurex.com/emisividad-en-la-medicion-de-temperatura-mediante-termografia/>

Antogarpe. (2022). Cómo funciona una cámara termográfica. Mesurex. [https://mesurex.com/como-funciona-una-camara-termografica/#:~:text=Una%20c%C3%A1mara%20termogr%C3%A1fica%20\(o%20c%C3%A1mara, en%20funci%C3%B3n%20de%20su%20temperatura.](https://mesurex.com/como-funciona-una-camara-termografica/#:~:text=Una%20c%C3%A1mara%20termogr%C3%A1fica%20(o%20c%C3%A1mara, en%20funci%C3%B3n%20de%20su%20temperatura.)

- Araiza-Olivares. (2022). La isla de calor en la Ciudad de México: un análisis decadal (1950-2010). *Revista Geográfica de América Central*, 69. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-25632022000200415
- Ariza. (2013). Descripción y corrección de productos Landsat 8 LDCM. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Recuperado 6 de abril de 2024, de <https://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
- Ayuda. Tú y la geografía. (s. f.). <https://cuentame.inegi.org.mx/ayuda/geografia.aspx?tema=A>
- Ayuntamiento de Toluca. (2023, 28 junio). Ayuntamiento de Toluca. <https://www2.toluca.gob.mx/ibu/>
- BBC News Mundo. (2019, 5 junio). Qué es el efecto de la isla de calor y por qué debe preocupar a las ciudades de América Latina. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-48531389>
- Blasco, J. A. (s. f.). Geometría urbana: los polígonos regulares como fundamento configurador de plazas. <https://urban-networks.blogspot.com/2020/07/geometria-urbana-los-poligonos.html>
- Candanedo, M. (s. f.). Efecto de las islas de calor urbano en las principales vías de la Ciudad de Panamá. <http://portal.amelica.org/ameli/journal/339/3391369004/>
- Casillas-Higuera et.al. (2013). Detección de la isla urbana de calor mediante modelado dinámico en Mexicali, B.C., México. *Información Tecnológica*, 25. <https://www.scielo.cl/pdf/infotec/v25n1/art15.pdf>
- Chen, Y.C., Lin, C.T., & Huang, S.W. (2014). Estimating urban heat islands using remote sensing and spatial analysis in a subtropical city. *International Journal of Remote Sensing*, 35(16), 5987–6000. <https://www.mdpi.com/2076-3298/8/10/105>
- Cielos, Chile. (2024, 15 febrero). Radiancia Espectral [Comentario sobre “Energía radiada por unidad de superficie”]. <https://twitter.com/CielosChile/status/1758145309576720400>
- CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA - IDEAM. (s. f.). <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/contaminacion-atmosferica>

- Conversation, Conversation, & Conversation. (2022). Efecto isla de calor urbano, el asesino climático. EcoPortal.net. <https://www.ecoportat.net/temas-especiales/efecto-isla-de-calor-urbano/>
- Data, G. U. (2019). Temperatura superficial terrestre ¿afecta a mi ciudad? Green Urban Data. <https://www.greenurbandata.com/2019/02/20/temperatura-superficial-terrestre/#:~:text=La%20temperatura%20del%20aire%20o,energ%C3%ADa%20que%20absorbe%20la%20tierra.>
- Dávila, Morales y Antonio, (2011). Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México. Revista de Climatología, 11(ISSN1578-8768), SN. <https://climatol.eu/reclim/reclim11a.pdf>
- De Ceupe, B. (2022). Ceupe. Ceupe. <https://www.ceupe.com/blog/ggis.html>
- De Enciclopedia Significados, E. (2015). Qué es la Altitud (definición y concepto). Enciclopedia Significados. <https://www.significados.com/altitud/>
- De Estadística y Geografía, I. N. (s. f.). Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). [https://www.inegi.org.mx/investigacion/ndvi/#:~:text=El%20NDVI%20es%20el%20m%C3%A1s,e%20infrarroja%20\(infrarrojo%20cercano\)](https://www.inegi.org.mx/investigacion/ndvi/#:~:text=El%20NDVI%20es%20el%20m%C3%A1s,e%20infrarroja%20(infrarrojo%20cercano))
- De Información Geográfica Geográfico, C. N. (s. f.). Concepto de ciudad | Ciudades (Bachillerato). https://educativo.ign.es/atlas-didactico/ciudades-bach/concepto_de_ciudad.html
- Definición, aplicación de la geografía y representaciones de la Tierra. (s.f, enero). Instituto Nacional de Estadística, Geografía E Informática. Recuperado 12 de enero de 2024, de https://www.inegi.org.mx/contenidos/inegi/spc/doc/INTERNET/1-GeografiaDeMexico/manual_def_apli_geo_repr_tierra-vs_.pdf
- Elizondo, G. F. M. B. G. Z. P. L. (s. f.). ¿Cómo mitigar las islas de calor en Monterrey? Instituto de Recursos Mundiales (WRI). <https://es.wri.org/insights/como-mitigar-las-islas-de-calor-en-monterrey>

- Encinas, M. (2011). MEDIO AMBIENTE y CONTAMIANCIÓN. PRINCIPIOS BÁSICOS (1.a ed.). [https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/16784/Medio%20Ambiente%20y%20Contami nación.%20Principios%20básicos.pdf?sequence=6](https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/16784/Medio%20Ambiente%20y%20Contami%20nación.%20Principios%20básicos.pdf?sequence=6)
- Equipo editorial, Etecé. (2021). Altitud - Concepto, medición, clima y diferencia con latitud. Concepto. <https://concepto.de/altitud/>
- Equipo editorial, Etecé. (2023). Ciudad: qué es, estructura, características, estilo de vida. Enciclopedia Humanidades. <https://humanidades.com/ciudad/>
- Equipo editorial, Etecé. (2023). Ciudad: qué es, estructura, características, estilo de vida. Enciclopedia Humanidades. <https://humanidades.com/ciudad/#ixzz8R6stVwjJ>
- Escardó, A. (2010). Clima y cambio climático. RAM (Revista del Aficionado A la Meteorología), 26(3ra etapa). <https://www.divulgameteo.es/fotos/lecturas/Clima-CC-Linés.pdf>
- Estimación de la Isla de Calor Urbana (UHI) con LANDSAT 8 y ARCGIS - PARTE 1. (2023). [Vídeo]. GEO GISS. Recuperado 1 de noviembre de 2023, de <https://www.youtube.com/watch?v=C2GCbMnUvdw&t=6s>
- Euroinnova Business School. (2020). El análisis numérico es la rama de las matemáticas que tiene como finalidad el diseño de algoritmos para simular procesos matemáticos más complejos. <https://www.euroinnova.mx/blog/que-estudia-la-geografia>
- Fazanes, A. R. (2024, 28 agosto). *¿Qué es la urbanización? Características y consecuencias*. Gloval. <https://www.gloval.es/blog/urbanizacion-caracteristicas-cosecuncias/>
- Fernández, S. (2021). Efecto isla de calor y su atenuación mediante elementos prefabricados de hormigón. ANDECE. <https://www.andece.org/efecto-isla-de-calor-y-su-atenuacion-mediante-elementos-prefabricados-de-hormigon/>
- Frąckiewicz, M. (2023). El uso de imágenes satelitales para la mitigación de islas de calor urbanas. TechSphere2. <https://ts2.space/es/el-uso-de-imagenes-satelitales-para-la-mitigacion-de-islas-de-calor-urbanas/#gsc.tab=0>

Gago, E.J. et. al (2013). The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects, Pages 749-758, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.057>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113003602>)

Galindo y Victoria, A. y R. (2012). La vegetación como parte de la sustentabilidad urbana: beneficios, problemáticas y soluciones, para el Valle de Toluca. Quivera, 14, 98-108.
<https://www.redalyc.org/pdf/401/40123894006.pdf>

GENERALIDADES. (s. f.). INEC. Recuperado 11 de enero de 2024, de
<https://www.inec.gob.pa/archivos/P5121generalidades.pdf>

GLOSARIO METEOROLOGICO. (2019). En INSTITUTO DE HIDROLOGIA METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES –IDEAM. Recuperado 11 de enero de 2024, de
<http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/Anexo+10.+Glosario+meteorológico.pdf/6a90e554-6607-43cf-8845-9eb34eb0af8e>

Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. (s. f.). Capítulo 7 Isla de calor urbana. En Buenos Aires Ciudad.
https://buenosaires.gob.ar/areas/med_ambiente/apra/des_sust/archivos/pacc/cap7_pacc_ba3030.pdf

HOJA METODOLÓGICA. (s. f.). [Conjunto de datos]. En Indicadores de la ILAC.
https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Ilac/Superficie_areas_verdes_urbanas_per_capita13.pdf

Ibáñez. (s. f.). Teledetección. Instituto Geográfico Nacional.
<https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf>

INEGI (2020) *Distribución. Estado de México.*
<https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/poblacion/distribucion.aspx?tema=me&e=15>

Ingeoexpert. (2018). ¿Qué es la teledetección y qué sistemas existen? Ingeoexpert.
<https://ingeoexpert.com/2018/07/06/que-es-la-teledeteccion/>

Introducción Sistemas de información geográfica. (2020).
<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/SIG/Introduccion-SIG.html>

Inzunza (2006). CAPITULO 4. TEMPERATURA. En Meteorología descriptiva. (pp. 85-111).
http://nimbus.com.uy/weather/Cursos/Curso_2006/Textos%20complementarios/Meteorologia%20descriptiva_Inzunza/cap4_Inzunza_Temperatura.pdf

Jáuregui, (s. f.). Las investigaciones sobre el clima urbano y contaminación del aire en la República Federal Alemana. Scielo. Recuperado 10 de enero de 2024, de
<https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n5/n5a4.pdf>

Johnson, D. (2018). Thermal sensors. En Elsevier eBooks (pp. 376-411).
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.10326-4>

Kapter. (2019) ¿Qué es la emisividad? - Kapter. Kapter. <https://www.kapter.mx/2019/07/03/que-es-la-emisividad>

Kogut, P. (2024). Teledetección satelital: tipos, usos y aplicaciones. EOS Data Analytics.
<https://eos.com/es/blog/teledeteccion/>

Kukla (1986), Karl (1988) citado por Sarricolea, P., & Martín-Vide, J. (2014). El estudio de la Isla de Calor Urbana de Superficie del Área Metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y Análisis de Componentes Principales. Norte Grande Geography Journal, 57, 123-141. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022014000100009b>

Las áreas verdes de la ciudad de México. Un reto actual. (s. f.). <https://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-331/sn-331-56.htm>

León (2017) Temperatura de la superficie terrestre. Tiempo.com | Meteored.
<https://www.tiempo.com/ram/329962/temperatura-la-superficie-terrestre/>

Libretexts. (2022). Cálculos de radiancia TOA y reflectancia TOA. LibreTexts Español.
[https://espanol.libretexts.org/Geociencias/Geograf%C3%ADa_\(F%C3%ADsica\)/Teledetecci%C3%B3n_\(Knudby\)/01%3A_Cap%C3%ADtulos/1.03%3A_C%C3%A1lculos_de_radiancia_TOA_y_reflectancia_TOA](https://espanol.libretexts.org/Geociencias/Geograf%C3%ADa_(F%C3%ADsica)/Teledetecci%C3%B3n_(Knudby)/01%3A_Cap%C3%ADtulos/1.03%3A_C%C3%A1lculos_de_radiancia_TOA_y_reflectancia_TOA)

Linares, Cuerdo y Díaz. (2023). ¿Qué es el fenómeno de la isla de calor urbana y cómo puede afectar a la salud? [Comunicado de prensa]. Recuperado 7 de noviembre de 2023, de <https://theconversation.com/que-es-el-fenomeno-de-la-isla-de-calor-urbana-y-como-puede-afectar-a-la-salud-206881>

Línea VerdeCeuta. (s. f.). <http://www.lineaverdeceutatrace.com/lv/consejos-ambientales/conoce-tu-entorno-natural/zonas-verdes.asp#>

Maldonado, L. M. (2022). Mitigación y adaptación al efecto de isla de calor urbana de clima cálido seco. El caso de Hermosillo, Sonora. <https://www.redalyc.org/journal/6651/665170661005/html/>

Mamani, Soto y Ruelas. (2022). Las de Calor urbano mediante imágenes satelitales en la ciudad de Juliaca durante el año 2019. Ciencia & Desarrollo, 21(1). <https://revistas.unjbg.edu.pe/index.php/cyd/article/view/1387/1697>

Manzanillo-Quiñones (2023) *Vista de Estimación de islas de calor urbanas en la ciudad de Uruapan, Michoacán, México.* <https://era.ujat.mx/index.php/rera/article/view/3495/1634>

Mccartney & Mehta (2020): Orozco. (2020). Análisis multianual del fenómeno de islas de calor con sensores remotos y estaciones climáticas en Bogotá, Colombia. Universidad del Norte. <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/9469/141557.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Sean McCartney, & Amita Mehta. (2020, 10 noviembre). *Teledetección Satelital para Islas de Calor Urbano.* NASA. https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/UHI_Part1_Span.pdf

Meléndez. (2022). Estaciones meteorológicas: precisión y tecnología para medir el clima. Advance. <https://somasadvance.com/expertise/estaciones-meteorologicas/>

Mercado y Marinic (2017). "MORFOLOGÍA DE ISLA DE CALOR URBANA EN HERMOSILLO, SONORA Y SU APOORTE HACIA UNA CIUDAD SUSTENTABLE." Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud 19: 27-33. <https://biotecnia.unison.mx/index.php/biotecnia/article/view/407/227>

- Mireles, Oralia y Hernández. (2018). MEMORIAS DEL XXVII CONGRESO MEXICANO DE METEOROLOGÍA DE LA OMMAC-VERACRUZ, Año 2018 [Comentario sobre “Islas de Calor en la Ciudad de México: Una Perspectiva desde Imágenes Satelitales de Percepción Remota”]. <http://www.ommac.org/memorias/memoria2018/resumen/R20180185.pdf>
- Momatiuk, J. E. A. Y. (2017). La meteorología. National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/ciencia/la-meteorologia>
- Moya (2020) De Chile Facultad de Arquitectura y Urbanismo, U., & Elisa, S. G. P. *Propuesta de reducción del efecto Isla de Calor Urbano Superficial (ICUS) en la ciudad de Curicó*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181173>
- National Geographic España. (2024). National Geographic. <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2022/08/cuales-son-los-principales-tipos-de-contaminacion-ambiental>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24.
- ONU (2018) citado por Hidalgo y Arco (2022). "Análisis espacio temporal de la Isla de Calor Urbana mediante imágenes satelitales: capitales de Andalucía." *ACE: Architecture, City and Environment*, 17(49), 10374. DOI: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/369420/10374_10999?sequence=1&isAllowed=y%20///%20https://upcommons.upc.edu/handle/2117/369420
- OpenAI. (2024). Qué es la vitalidad en las plantas y clasificarlo en categorías desde muy bajo hasta muy alto. [Respuesta]. <https://openai.com/vitalidad-en-las-plantas>
- Parque, F. M. (s. f.). Contaminación urbana y áreas verdes: La generación de valor – Fundación Mi Parque. <https://www.miparque.cl/es/contaminacion-urbana-y-areas-verdes-la-generacion-de-valor/>
- Percepción remota. (s. f.). <https://2006-2012.semarn.gob.mx/informacion-sector/ciencia/ermexs/temas-de-interes/384-percepcion-remota.html>

- Portillo, G. (2023). Efecto albedo: qué es y consecuencias. *ecologiaverde.com*.
<https://www.ecologiaverde.com/efecto-albedo-que-es-y-consecuencias-4634.html>
- Porto, J. P. y Gardey, A. (2023, 29 agosto). *Altitud - Qué es, definición y concepto*. Definición.de.
<https://definicion.de/altitud/>
- Qué es la Emisividad? | Fluke Process Instruments. (s. f.). Fluke Process Instruments.
<https://www.flukeprocessinstruments.com/es/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/what-emissivity%3F>
- Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. *Solar Energy*, 206, 979–995
https://energypedia.info/wiki/Solar_Energy?gad_source=1&gclid=EAlaQobChMI7Jb7w7e eiQMVOM3CBB3TxyG3EAAYASAAEgKdTPD BwE#Overview
- Sep. (s. f.). ¿Realmente tienes calor? <https://nuevaescuelamexicana.sep.gob.mx/detalle-ficha/3568/>
- Shalaby. (2011). Urban Heat Island and Cities Desing: A Conceptual framework of Mitigation tools in hot-arid regions. *Revista de Investigación Urbana de la Universidad de el Cairo*, 8, 123-144. https://jur.journals.ekb.eg/article_94276_df4affed3aec60fefc3ec75b46819841.pdf
- Soto-Soto- Garzón y Jiménez. (2019). Análisis de islas de calor urbano usando imágenes Landsat: caso de estudio Armenia-Colombia 1996-2018. *Revista ESPACIOS*, pag.9: 41(8).
<https://www.revistaespacios.com/a20v41n08/a20v41n08p09.pdf>
- Sposob, G. (2023). Zona urbana: qué es y sus características. *Enciclopedia Humanidades*.
<https://humanidades.com/zona-urbana/>
- Stone, B. (2009). Land use as climate change mitigation. *Environmental Science & Technology*, 43(24), 9052–9056.
https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/es902150g?ref=article_openPDF
- Teledetección satelital – FutureWater. (s. f.).
<https://www.futurewater.eu/herramientas/teledeteccion-satelital/>

TEMA 5. LA CIUDAD RENACENTISTA Y BARROCA: 5.2 El urbanismo barroco. Orden y geometría. (s. f.). OCW. <https://ocw.ehu.eus/mod/book/view.php?id=43445&chapterid=219>

Temperatura de brillo _ AcademiaLab. (s. f.). <https://academia-lab.com/enciclopedia/temperatura-de-brillo/>

Thapa, Pawan (2021) "Urban Heat Island Analysis Using Landsat 8 Satellite Data." Departamento de Ingeniería Geomática, Universidad de Katmandú, Dhulikhel, Nepal. <https://www.mdpi.com/2504-3900/2/7/358>

The climate of London, deduced from meteorological observations, made in the Metropolis, and at various places around it / by Luke Howard. (s. f.). Wellcome Collection. <https://wellcomecollection.org/works/y73fcwsn/items?canvas=32>

Tiempo atmosférico y clima | CIIFEN. (s. f.). <https://ciifen.org/tiempo-atmosferico-clima/>

Toribio (2020). NDVI, ¿qué es y para qué sirve? Cursos de Teledetección, Drones y LIDAR - Formación presencial y online en Drones, teledetección y LIDAR. <https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>

Tucker, C. J. (1979). *Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150.

Valero y Torres, (2017). SIGICU- SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA WEB DE ISLAS DE CALOR URBANAS [Trabajo de grado en modalidad de monografía presentado como requisito parcial para optar por el título de especialista en Sistemas de Información Geográfica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad de Ingeniería]. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/14681/1/TorresGuerreroVladimir2018.pdf>

Vargas Pérez, A., Loureiro Sancho, V., Cintero Romera, M., Espasandín Hernán, A., Baron, G., & Inchingolo, F. (2019, May 15). *PLANTHY: A smart care for a healthy plant*.

Vélez, J. A. y Vera, S. G. (2018). EVALUACIÓN y PROPUESTA DE ESTRATEGÍAS DE MITIGACIÓN ANTE EFECTOS DE LAS ISLAS DE CALOR URBANO PRESENTES EN EL CANTÓN DURÁN [Proyecto Integrador, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL

LITORAL]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/46153/1/D-CD109079.pdf>

Voogt, J. A. y Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384.
https://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5656337/mod_resource/content/0/Voogt%20Oke%201997%20thermal%20remote%20sensing%20of%20urban%20climates.pdf

Washington, M., P., y Trindade. (2016). ANÁLISIS DE LA ISLA DE CALOR DE SUPERFICIE EN LA CIUDAD DE UBATUBA, BRASIL. Asociación Española de Climatología, A10, 122-128.
https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/57979/1/2016_X-Congreso-AEC-Alicante_11.pdf

Wingen, D. (2023). ¿Qué son las islas de calor urbano y cómo afectan a la salud de las personas? Tiempo.com | Meteored. <https://www.tiempo.com/noticias/actualidad/que-son-las-islas-de-calor-urbano-y-como-afectan-a-la-salud-de-las-personas.html#:~:text=El%20origen%20del%20t%C3%A9rmino%20se,poco%20m%C3%A1s%20de%2020%C2%BAC>

Zavaleta-Palacios et.al. (2020). Urbanización y su relación con la isla de calor en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Scielo, Ecosistemas Y Recursos Agropecuarios* 7(2).
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282020000200107