



**Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Planeación Urbana y Regional
Licenciatura en Ciencias Ambientales**



**IDENTIFICACIÓN DE ISLAS DE CALOR EN LA ZONA METROPOLITANA DEL
VALLE DE TOLUCA.**

T E S I S

Que para obtener el Título de:

Licenciada en Ciencias Ambientales

P R E S E N T A :

María Isabel Martínez Peña

Directora:

Dra. en A. Ana Marcela Gómez Hinojos

Toluca, Estado de México, 2022

Índice

Resumen	10
Abstract	11
Introducción.....	12
Esquema de la investigación.....	15
Justificación	15
Contribución de la propuesta	16
Objetivo general	16
Objetivos particulares.....	16
Hipótesis	17
Planteamiento del problema	17
Metodología	19
a. Alcance	20
b. Diseño	20
c. Población de estudio	20
d. Instrumento de medición	20
e. Recolección de datos	20
f. Análisis estadístico / cartográfico.....	21
Capítulo 1. Antecedentes	23
1.1 Ámbito internacional.....	23
1.2 Ámbito nacional.....	29
1.3 Ámbito local	33
Capítulo 2. Marco Teórico	36
2.1 Clima.....	36
2.1.1 Meteorología	36
2.1.2 Atmósfera.....	37
2.1.3 Elementos del clima	38
2.1.3.1 Elementos geodinámicos	38
2.1.3.2. Elementos acuosos.....	39
2.1.4. Factores del clima	40

2.1.4 Clasificación del clima	40
2.1.5 Escalas del clima	41
2.2 Radiación y temperatura	42
2.2.1 Radiación	42
2.2.2 Albedo.....	43
2.2.3 Transferencia de calor	44
2.2.4 Temperatura.....	44
2.3. Clima urbano.....	46
2.3.1 Ecosistema urbano	47
2.3.2 Balance de energía	49
2.3.3 Escalas urbanas.....	51
2.3.4 Metodologías para el análisis del clima urbano.....	52
2.4 Isla de Calor	53
2.4.1 Causas de las Islas de Calor.....	54
2.4.2 Tipos de Islas de Calor	55
2.4.3 Medición.....	57
2.4.4 Intensidad de la Isla de Calor.....	58
2.4.5 Consecuencias de las Islas de Calor	59
2.5 Sistemas de Información Geográfica	60
2.5.1 Software de los Sistemas de Información Geográfica.....	61
2.5.1 Percepción remota en los Sistemas de Información Geográfica.....	62
2.5.2 Sensores utilizados para la adquisición de información geoespacial.....	62
2.6. Imágenes satelitales	63
2.6.1. Procesamiento de imágenes satelitales	63
2.6.2. Landsat	64
2.6.3. SPOT	65
2.6.4. Sentinel	65
2.7. Normatividad aplicable a las Islas de Calor	66
2.7.1. Normatividad internacional aplicable a Islas de Calor	66
2.7.2. Normatividad nacional aplicable a Islas de Calor	67
Capítulo 3. Marco contextual	70
3.1 Zona Metropolitana del Valle de Toluca.....	70

3.2 Descripción del ecosistema urbano	71
3.2.1 Clima de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca	72
3.2.2 Vegetación de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca	73
3.2.3 Relieve de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca	75
3.2.4 Hidrología de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca	76
3.2.5 Sistema de edificaciones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca...	76
3.3. Actividades económicas de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca	77
3.3.1 Actividades económicas primarias	78
3.3.2 Actividades económicas secundarias	78
Capítulo 4. Resultados y observaciones.....	81
4.1 Temperatura superficial primavera.....	83
4.1.1 Primavera diurna 2018.....	83
4.1.2 Primavera diurna 2019.....	85
4.1.3 Primavera diurna 2020.....	87
4.1.4 Primavera nocturna 2018.....	89
4.1.5 Primavera nocturna 2019.....	91
4.1.6 Primavera nocturna 2020.....	93
4.1.7 Análisis de temperatura superficial primavera diurna 2018 – 2020.....	95
4.1.8 Análisis de temperatura superficial primavera nocturna (2018 – 2020)	96
4.1.9 Correlación vegetación y espacios urbanos vs temperatura primavera diurna 2018 – 2020.....	97
4.2 Temperatura superficial verano.....	98
4.2.1 Verano diurno 2018.....	98
4.2.2 Verano diurno 2019.....	100
4.2.3 Verano diurno 2020.....	102
4.2.4 Verano nocturno 2018.....	104
4.2.5 Verano nocturno 2019.....	106
4.2.6 Verano nocturno 2020.....	108
4.2.7 Análisis de temperatura superficial verano diurno 2018 – 2020.....	110
4.2.8 Análisis de temperatura superficial verano nocturno 2018 – 2020.....	111
4.2.9 Correlación vegetación y espacios urbanos vs temperatura verano diurno 2018 – 2020.....	112

4.3 Temperatura superficial otoño.....	113
4.3.1 Otoño diurno 2018	113
4.3.2 Otoño diurno 2019	115
4.3.3 Otoño diurno 2020	117
4.3.4 Otoño nocturno 2018	119
4.3.5 Otoño nocturno 2019	121
4.3.6 Otoño nocturno 2020	123
4.3.7 Análisis de temperatura superficial otoño diurno 2018 – 2020.....	125
4.3.8 Análisis de temperatura superficial otoño nocturno 2018 – 2020.....	126
4.3.9 Correlación vegetación y espacios urbanos vs temperatura otoño diurno 2018 – 2020.....	127
4.4 Temperatura superficial invierno	128
4.4.1 Invierno diurno 2018	128
4.4.2 Invierno diurno 2019	130
4.4.3 Invierno diurno 2020	132
4.4.4 Invierno nocturno 2018	134
4.4.5 Invierno nocturno 2019	136
4.4.6 invierno nocturno 2020.....	138
4.4.7 Análisis de temperatura superficial invierno diurno 2018 – 2020	140
4.4.8 Análisis de temperatura superficial invierno nocturno 2018 – 2020	141
4.4.9 Correlación vegetación y espacios urbanos vs temperatura invierno diurno 2018 – 2020.....	142
4.5 Análisis de temperatura superficial 2018	143
4.6 Análisis de temperatura superficial 2019	145
4.7 Análisis de temperatura superficial 2020	147
4.8 Observaciones generales	149
Conclusiones.....	152
Recomendaciones.....	156
Bibliografía	157

Índice de imágenes

Imagen 1. Metodología.....	19
Imagen 2.1 Estructura vertical de la atmósfera.	38
Imagen 2.2 Espectro electromagnético.	42
Imagen 2.3 Componentes de un ecosistema urbano.	47
Imagen 2.4 Capas del sistema climático urbano.	50
Imagen 2.5 Tipos de Islas de calor.....	56
Imagen 4.1 Análisis de temperatura superficial correspondiente a la temporada de primavera diurna de los años 2018- 2020.	95
Imagen 4.2 Análisis de temperatura superficial correspondiente a la temporada de primavera nocturna de los años 2018- 2020.	96
Imagen 4.3 Correlación vegetación / temperatura primavera diurna 2018 – 2020.	97
Imagen 4.4 Análisis de temperatura superficial correspondiente a la temporada de verano diurno de los años 2018- 2020.	110
Imagen 4.5 Análisis de temperatura superficial correspondiente a la temporada de verano nocturno de los años 2018- 2020.	111
Imagen 4.6 Correlación vegetación / temperatura verano diurno 2018 – 2020. ...	112
Imagen 4.7 Análisis de temperatura superficial correspondiente a la temporada de otoño diurno de los años 2018- 2020.	125
Imagen 4.8 Análisis de temperatura superficial correspondiente a la temporada de otoño nocturno de los años 2018- 2020.	126
Imagen 4.9 Correlación vegetación / temperatura otoño diurno 2018 – 2020.	127
Imagen 4.10 Análisis de temperatura superficial correspondiente a la temporada de invierno diurno de los años 2018- 2020.	140
Imagen 4.11 Análisis de temperatura superficial correspondiente a la temporada de invierno nocturno de los años 2018- 2020.	141
Imagen 4.12 Correlación vegetación / temperatura invierno diurno 2018 – 2020.	142
Imagen 4.13 Análisis de temperatura superficial correspondiente al año 2018. .	143
Imagen 4.14 Análisis de temperatura superficial correspondiente al año 2019. .	145
Imagen 4.15 Análisis de temperatura superficial correspondiente al año 2020. .	147

Índice de mapas

Mapa 3.1 Localización geográfica de la ZMVT.....	70
Mapa 3.2 Climas que se presentan en la ZMVT.	72
Mapa 3.3 Usos de suelo en la ZMVT	74
Mapa 3.4 Rangos de altitud en la ZMVT	75
Mapa 3.5 Hidrología correspondiente a la ZMVT.	76
Mapa 3.6 Unidades económicas en la ZMVT, agrupadas por tipo de actividad. ...	77
Mapa 4.1 Identificación de la Isla de Calor diurna, primavera 2018.	83
Mapa 4.2 Identificación de la Isla de Calor diurna, primavera 2019	85
Mapa 4.3 Identificación de la Isla de Calor diurna, primavera 2020.	87
Mapa 4.4 Identificación de la Isla de Calor nocturna, primavera 2018.	89
Mapa 4.5 Identificación de la Isla de Calor nocturna, primavera 2019.	91
Mapa 4.6 Identificación de la Isla de Calor nocturna, primavera 2020.	93
Mapa 4.7 Identificación de la Isla de Calor diurna, verano 2018.	98
Mapa 4.8 Identificación de la Isla de Calor diurna, verano 2019.	100
Mapa 4.9 Identificación de la Isla de Calor diurna, verano 2020.	102
Mapa 4.10 Identificación de la Isla de Calor nocturna, verano 2018.	104
Mapa 4.11 Identificación de la Isla de Calor nocturna, verano 2019.	106
Mapa 4.12 Identificación de la Isla de Calor nocturna, verano 2020.	108
Mapa 4.13 Identificación de la Isla de Calor diurna, otoño 2018.	113
Mapa 4.14 Identificación de la Isla de Calor diurna, otoño 2019.	115
Mapa 4.15 Identificación de la Isla de Calor diurna, otoño 2020.	117
Mapa 4.16 Identificación de la Isla de Calor nocturna, otoño 2018.	119
Mapa 4.17 Identificación de la Isla de Calor nocturna, otoño 2019.	121
Mapa 4.18 Identificación de la Isla de Calor nocturna, otoño 2020.	123
Mapa 4.19 Identificación de la Isla de Calor diurna, invierno 2018.	128
Mapa 4.20 Identificación de la Isla de Calor diurna, invierno 2019.	130
Mapa 4.21 Identificación de la Isla de Calor diurna, invierno 2020.	132
Mapa 4.22 Identificación de la Isla de Calor nocturna, invierno 2018.	134
Mapa 4.23 Identificación de la Isla de Calor nocturna, invierno 2019.	136
Mapa 4.24 Identificación de la Isla de Calor nocturna, invierno 2019.	138

Índice de tablas

Tabla 2.1 Porcentaje de albedo para diferentes superficies.....	44
Tabla 3.1 Municipios que integran la ZMVT.....	71
Tabla 3.2 Parques industriales en la ZMVT.....	78
Tabla 4.1 Área ocupada por temperaturas, primavera diurna 2018.....	84
Tabla 4.2 Área ocupada por temperaturas, primavera diurna 2019.....	86
Tabla 4.3 Área ocupada por temperaturas, primavera diurna 2020.....	88
Tabla 4.4 Área ocupada por temperaturas, primavera nocturna 2018.....	90
Tabla 4.5 Área ocupada por temperaturas, primavera nocturna 2019.....	92
Tabla 4.6 Área ocupada por temperaturas, primavera nocturna 2019.....	94
Tabla 4.7 Área ocupada por temperaturas, verano diurno 2018.....	99
Tabla 4.8 Área ocupada por temperaturas, verano diurno 2019.....	101
Tabla 4.9 Área ocupada por temperaturas, verano diurno 2020.....	103
Tabla 4.10 Área ocupada por temperaturas, verano nocturno 2018.....	105
Tabla 4.11 Área ocupada por temperaturas, verano nocturno 2019.....	107
Tabla 4.12 Área ocupada por temperaturas, verano nocturno 2020.....	109
Tabla 4.13 Área ocupada por temperaturas, otoño diurno 2018.....	114
Tabla 4.14 Área ocupada por temperaturas, otoño diurno 2019.....	116
Tabla 4.15 Área ocupada por temperaturas, otoño diurno 2020.....	118
Tabla 4.16 Área ocupada por temperaturas, otoño nocturno 2018.....	120
Tabla 4.17 Área ocupada por temperaturas, otoño nocturno 2019.....	122
Tabla 4.18 Área ocupada por temperaturas, otoño nocturno 2020.....	124
Tabla 4.19 Área ocupada por temperaturas, invierno diurno 2018.....	129
Tabla 4.20 Área ocupada por temperaturas, invierno diurno 2019.....	131
Tabla 4.21 Área ocupada por temperaturas, invierno diurno 2020.....	133
Tabla 4.22 Área ocupada por temperaturas, invierno nocturno 2018.....	135
Tabla 4.23 Área ocupada por temperaturas, invierno nocturno 2018.....	137
Tabla 4.24 Área ocupada por temperaturas, invierno nocturno 2020.....	139

Índice de gráficos

Gráfico 4.1 Área ocupada por temperaturas, primavera diurna 2018.....	84
Gráfico 4.2 Área ocupada por temperaturas, primavera diurna 2019.....	86
Gráfico 4.3 Área ocupada por temperaturas, primavera diurna 2020.....	88
Gráfico 4.4 Área ocupada por temperaturas, primavera nocturna 2018.....	90
Gráfico 4.5 Área ocupada por temperaturas, primavera nocturna 2019.....	92
Gráfico 4.6 Área ocupada por temperaturas, primavera nocturna 2019.....	94
Gráfico 4.7 Área ocupada por temperaturas, verano diurno 2018.....	99
Gráfico 4.8 Área ocupada por temperaturas, verano diurno 2019.....	101
Gráfico 4.9 Área ocupada por temperaturas, verano diurno 2020.....	103
Gráfico 4.10 Área ocupada por temperaturas, verano nocturno 2018.....	105
Gráfico 4.11 Área ocupada por temperaturas, verano nocturno 2019.....	107
Gráfico 4.12 Área ocupada por temperaturas, verano nocturno 2020.....	109
Gráfico 4.13 Área ocupada por temperaturas, otoño diurno 2018.....	114
Gráfico 4.14 Área ocupada por temperaturas, otoño diurno 2019.....	116
Gráfico 4.15 Área ocupada por temperaturas, otoño diurno 2020.....	118
Gráfico 4.16 Área ocupada por temperaturas, otoño nocturno 2018.....	120
Gráfico 4.17 Área ocupada por temperaturas, otoño nocturno 2019.....	122
Gráfico 4.18 Área ocupada por temperaturas, otoño nocturno 2020.....	124
Gráfico 4.19 Área ocupada por temperaturas, invierno diurno 2018.....	129
Gráfico 4.20 Área ocupada por temperaturas, invierno diurno 2019.....	131
Gráfico 4.21 Área ocupada por temperaturas, invierno diurno 2020.....	133
Gráfico 4.22 Área ocupada por temperaturas, invierno nocturno 2018.....	135
Gráfico 4.23 Área ocupada por temperaturas, invierno nocturno 2019.....	137
Gráfico 4.24 Área ocupada por temperaturas, invierno nocturno 2020.....	139

Resumen

Las Islas de Calor son un ejemplo del impacto que generan los seres humanos en los sistemas ecológicos, bajo la premisa de que este fenómeno se presenta en grandes ciudades y metrópolis donde sus alrededores usualmente son más frescos que el centro de las ciudades.

Este fenómeno tiene diferentes consecuencias, las principales enfocadas en el incremento de reacciones químicas que derivan en la contaminación del aire y que tienen un impacto en la salud de los seres vivos que habitan estas áreas, además del incremento en el consumo de energía eléctrica y la contaminación del agua.

Por lo cual, un estudio espacio – temporal permite la identificación de Islas de Calor, su distribución y comportamiento durante un periodo de tiempo establecido. El presente estudio se lleva a cabo con el uso de imágenes satelitales obtenidas del satélite europeo Sentinel 3, con el propósito de identificar la presencia de Islas de Calor dentro de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y su comportamiento a lo largo de tres años consecutivos.

Abstract

The Urban Heat Islands are an example of human impact within ecological systems, due to the premise that this phenomenon is present in large cities and metropolis which surroundings are usually fresher than the city core.

This phenomenon has different consequences, mainly focused on the increased rate of chemical reactions leading to air pollution, that leads to illness in the living beings in those areas and the increase on budgets for electricity and water pollution.

Spatial-temporal analysis allows the identification of Urban Heat Islands their distribution and behavior for a set time period. This study was made with data of the European satellite Sentinel 3, with the purpose of identify the Urban Heat Islands in the Metropolitan Area of Toluca and their behavior along tree consecutive years.

Introducción

El cambio climático es uno de los temas con mayor relevancia en la actualidad debido a las consecuencias que este tiene en los sistemas sociales, ambientales y económicos; un elemento importante a considerar dentro de estos sistemas son las ciudades, debido a que dentro de ellas se producen intercambios de materia y energía importantes para el desarrollo de las sociedades modernas (Sánchez Rodríguez, 2013). En la actualidad, se sabe que las grandes metrópolis albergan a un tercio de la población mundial y se proyecta que este porcentaje aumentará con el paso de los años (ONU Hábitat, 2020).

En este sentido, las metrópolis y ciudades son sistemas complejos por sí mismos, y por lo tanto pueden ser estudiados desde la perspectiva ecosistémica, dado que están compuestos por elementos bióticos y abióticos, a los que se suma la presencia humana (Oke, et al., 2017).

Uno de los elementos abióticos a considerar es el clima urbano, pues a lo largo de la historia de la humanidad se han realizado observaciones sobre las modificaciones al clima ocasionadas por la presencia humana y el desarrollo de asentamientos humanos (Howard, 1833; Lowry, 1977; Jáuregui-Ostos, 1979; Landsberg, 1981), a partir de estas observaciones se hizo evidente la presencia de un fenómeno térmico dentro de las ciudades, y que para el año de 1958 Manley denomina como Isla de Calor Urbano.

El concepto de Isla de Calor ha sido construido a partir de las observaciones realizadas por científicos de la climatología urbana en diferentes momentos de la historia, la definición parte de la identificación de una diferencia de la temperatura que se presenta en las ciudades respecto de los entornos rurales que la rodean (Howard, 1833), por lo que se asocia esta diferencia de temperatura con la presencia de edificaciones en los entornos urbanizados y la falta de estos en la zona rural (Lowry, 1977).

Las alteraciones al clima urbano que generan las Islas de Calor son de especial interés para la comunidad científica y social, dado que la presencia de este fenómeno genera consecuencias que pueden ser englobadas en: aumento del consumo de energía, incremento de gases contaminantes, afectaciones a la salud y la disminución de la calidad del agua (EPA, 2008) dentro de las zonas urbanas.

De acuerdo con información de ONU Hábitat (2020), en el mundo existen 1934 metrópolis, de las cuales doscientos quince se encuentran en América Latina, siendo México el segundo país con más zonas metropolitanas en la región, solamente precedido por Brasil.

Una de estas metrópolis es la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), en la que se ha trabajado el tema de las Islas de Calor de manera intermitente, investigadores como Jáuregui (1979), quien realizó una de las primeras identificaciones de la Isla de Calor en la ciudad de Toluca; Morales Méndez (2007), quien utiliza estaciones de monitoreo atmosférico para identificar la Isla de Calor en la ciudad de Toluca; en años más recientes Rivera, Antonio-Némiga y otros autores (2017), realizan un estudio de Islas de Calor para quince municipios de la ZMVT con ayuda de imágenes Landsat y datos de estaciones de monitoreo atmosférico.

En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo la identificación de Islas de Calor en los veintidós municipios que conforman la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, mediante el uso de imágenes satelitales obtenidas del satélite europeo Sentinel 3.

Para ello se desarrollan cinco capítulos, de los cuales el primero contiene una recopilación de los antecedentes asociados al tema de las Islas de Calor, revisando primero autores en el ámbito internacional, posteriormente trabajos dentro de la República Mexicana y finalmente un apartado orientado a trabajos realizados dentro de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Dentro del segundo capítulo se construye un marco teórico a partir de los conceptos que ayudan a comprender la naturaleza del fenómeno Islas de Calor, partiendo de

temas fundamentales como lo son el clima y la meteorología, la radiación, la temperatura, el clima y ecosistema urbano, además de una revisión básica de conceptos asociados a Sistemas de Información Geográfica y la percepción remota debido a su importancia en los objetivos planteados en la presente investigación; para finalizar este capítulo se realiza una revisión breve de la normatividad aplicable a nivel nacional como internacional para el fenómeno Islas de Calor.

Por otra parte, el contenido del capítulo tres se enfoca en una caracterización de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, de manera que brinde un panorama general de las condiciones naturales, sociales y económicas que prevalecen en la zona de estudio y que pueden tener un impacto positivo o negativo en la presencia de Islas de Calor.

Posteriormente, dentro del cuarto capítulo se presentan los resultados y observaciones obtenidos del procesamiento de imágenes satelitales y la cartografía temática elaborada para el análisis del fenómeno Islas de Calor, en este apartado se ordenan los resultados por temporada (primavera, verano, otoño e invierno) y año (2018, 2019 y 2020), es decir, en primer lugar se muestran los datos correspondientes a la temporada diurna de 2018, 2019 y 2020, seguido de los resultados de la misma temporada en el caso nocturno para los mismos años, a continuación se realiza un análisis comparando los resultados obtenidos en el periodo 2018 – 2020 primero para el caso diurno y posteriormente el nocturno, se cierra cada temporada con un análisis de la relación entre la vegetación y los espacios urbanizados respecto de los registros de temperatura superficial analizados, para finalizar el capítulo se muestra una comparación de los resultados de temperatura superficial obtenidos por año.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones que surgieron del análisis de datos, seguido de la bibliografía consultada para la elaboración de este trabajo de investigación.

Esquema de la investigación

Justificación

Las Islas de Calor son un fenómeno que actualmente se presenta en la mayoría de las zonas urbanizadas del mundo, por lo cual su estudio se vuelve relevante conforme se asocian diferentes problemáticas económicas, sociales y ambientales a dicho fenómeno.

En el Estado de México, el 87.4% de la población se denomina como urbana (INEGI, 2020), por lo cual existen más posibilidades de que a causa de la gran cantidad de personas que habitan las zonas urbanas, el exceso de viviendas y la falta de zonas verdes, el fenómeno de las Islas de Calor Urbanas (ICU), se presente en la mayor parte de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT).

Tomando en cuenta las perspectivas de urbanización que se tienen para la ZMVT, derivadas de su crecimiento demográfico, un estudio de tipo longitudinal de tendencia sobre el fenómeno de las Islas de Calor resulta importante dado que podrán establecerse relaciones de causalidad entre los factores que inciden en el fenómeno y a partir de ello obtener un panorama general del comportamiento del fenómeno a futuro.

Se han realizado estudios sobre el tema en la zona centro del municipio de Toluca con ayuda de datos de estaciones meteorológicas (Morales-Méndez, et al., 2007), por lo que, al ampliar la cantidad de información disponible sobre la temática, a partir de fuentes de información tales como las imágenes satelitales resulta oportuno, ya que este tipo de material tiene la capacidad de cubrir porciones de territorio más grandes que las áreas que monitorean usualmente las estaciones meteorológicas convencionales.

Contribución de la propuesta

A partir del procesamiento de imágenes satelitales obtenidas de la misión Sentinel 3, el presente trabajo de investigación pretende realizar un desglose de cartografía temática al respecto de la vegetación y temperatura para identificar la presencia de ICU.

El uso de imágenes satelitales es una técnica que ha sido poco utilizada en la zona de estudio, y que permite generar información sobre las diferentes áreas de la ZMVT, que no cuentan con una estación meteorológica con datos recientes de temperatura, por lo que a través del método a realizar se podrán establecer comparaciones de temperatura entre diferentes lapsos de tiempo.

El establecimiento de este tipo de metodologías en el análisis de ICU contribuirán a la generación de información base para el desarrollo de proyectos con temática ambiental y desarrollo sustentable.

Objetivo general

El objetivo del presente trabajo es identificar y modelar la presencia de Islas de Calor en las zonas urbanas de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, a partir de imágenes satelitales obtenidas del satélite europeo Sentinel 3.

Objetivos particulares

- ∞ Establecer la temporalidad de los lapsos de estudio de las imágenes satelitales con base en la información obtenida del satélite Sentinel 3.
- ∞ Definir el tratamiento de las imágenes obtenidas en función del uso al que se va a destinar.
- ∞ Modelar las ICU con ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), y la información contenida en las bandas seleccionadas.
- ∞ Graficar los datos obtenidos del modelado de imágenes con ayuda del software SNAP (Sentinel Application Platform).
- ∞ Representar de manera cartográfica las ICU identificadas.
- ∞ Establecer una correlación entre las ICU, la vegetación y los espacios urbanos.

Hipótesis

De los 22 municipios que conforman la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, se espera que las Islas de calor se presenten en seis de ellos: Toluca, Metepec, San Mateo Atenco, Lerma, Santiago Tianguistenco y Ocoyoacac

Planteamiento del problema

Las Islas de Calor son un fenómeno meteorológico, que se forma cuando el aire caliente tiende a acumularse en el centro de las ciudades, debido a la concentración de edificios y de calles pavimentadas; este aire caliente se eleva, arrastrando consigo la carga de contaminación; luego se expande hacia los bordes de la ciudad y se enfría (Romero Dávila, et al., 2011).

La ZMVT es una de las tres zonas metropolitanas del Estado de México, y en ella se encuentran establecidas importantes zonas industriales y zonas habitacionales, por lo cual el índice de urbanización es alto, esto desencadena los cambios de uso de suelo que principalmente se transforma de agrícola o forestal a urbano, lo cual incide en la formación de las Islas de Calor.

El estudio de las Islas de Calor para la ZMVT resulta importante dada la influencia que éstas tienen en los cambios de temperatura a largo plazo dentro de una región. Pues dadas las características del relieve, la zona de estudio presenta tipos de climas en los que la temperatura media máxima usualmente no supera los 25° C (Servicio Meteorológico Nacional, 2008), pero en los últimos años han sido reportados datos que superan este número.

En 2007, se llevó a cabo una investigación sobre la Isla de Calor en la zona centro del municipio de Toluca, el método utilizado fue el análisis de información proporcionada por las Red de Monitoreo Atmosférico (RAMA), y a partir de estos datos se elaboraron isotermas que hacen posible la visualización espacial de las temperaturas registradas en la zona de estudio (Morales-Méndez, et al., 2007). Este es el método más utilizado para la identificación del fenómeno en áreas urbanas.

Actualmente, con la ayuda de las bandas que conforman las imágenes satelitales, es posible obtener la información de temperaturas y algunos otros datos de ayuda para la identificación de la IC, por lo que el proceso de preparación y procesamiento de la información se puede automatizar y de esta manera obtener resultados en un menor tiempo.

Tal es el caso del estudio realizado por Rivera, Antonio-Némiga y otros (2017), quienes utilizando como referencia 15 municipios de la ZMVT y haciendo uso de imágenes Landsat 8, identifican la presencia de ICU para cada estación del año.

La información resultante puede ser útil en diversos aspectos, tales como la planeación de la expansión de la mancha urbana o la incorporación de medidas de adaptación y/o mitigación a los efectos negativos que produce la ICU dentro de las ciudades, por lo cual, realizar un estudio considerando los 22 municipios de la ZMVT es importante debido a la expansión de la urbanización e industria que ha tenido lugar durante los últimos años en el lugar.

Metodología

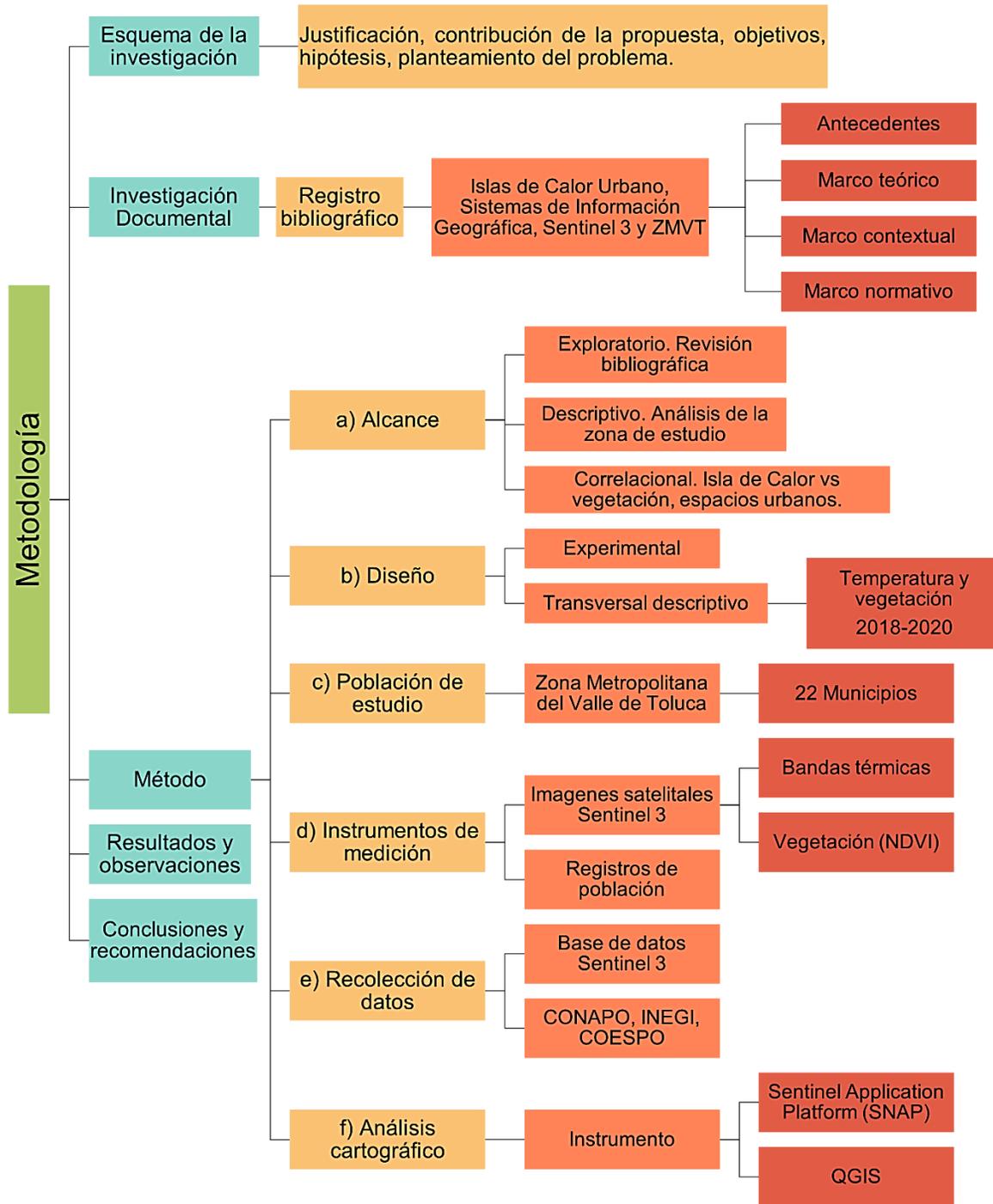


Imagen 1. Metodología
Fuente: elaboración propia.

a. Alcance

De acuerdo con las características y los objetivos planteados para el presente estudio, se plantea en primer lugar un enfoque exploratorio que consistirá en la revisión de bibliografía relacionada al tema, con la finalidad de establecer un panorama general de los estudios realizados bajo la temática de las ICU; posteriormente se utilizará un enfoque descriptivo para realizar el análisis de la zona de estudio, que en este caso será la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, y finalmente se hará uso del enfoque correlacional para establecer la relación entre la presencia de las ICU, la vegetación y los espacios urbanos.

b. Diseño

Con el propósito de lograr los objetivos planteados, la presente investigación se basa en un diseño de tipo experimental y transversal descriptivo (Hernández Sampieri, 2014), al manipular las variables de temperatura y vegetación normalizada arrojadas por las imágenes satelitales necesarias para la identificación de la ICU, y realizar el estudio durante un periodo de tiempo establecido 2018-2020.

c. Población de estudio

Para la realización del estudio, se utilizará la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y los 22 municipios que la componen como área de estudio.

d. Instrumento de medición

Se utilizarán imágenes satelitales pertenecientes al satélite europeo Sentinel 3 de uso abierto, en específico aquellas que dispongan de bandas de información térmica para el análisis de la distribución de ICU dentro de la ZMVT.

e. Recolección de datos

La recopilación de imágenes se llevará a cabo mediante la base de datos del satélite Sentinel 3; mientras que los registros de población serán obtenidos del Instituto

Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Consejo Nacional de Población (CONAPO).

f. Análisis estadístico / cartográfico

Los datos obtenidos serán procesados con ayuda del programa Excel®, perteneciente a la paquetería de Microsoft Office, para su ordenación en tabulados y el análisis de correlación entre las variables definidas. Además del programa SNAP (Sentinel Application Platform), de uso libre, propiedad de la Agencia Espacial Europea, para la manipulación de la información contenida en las imágenes satelitales. Además, se realizará cartografía temática mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Capítulo 1

Antecedentes



Capítulo 1. Antecedentes

Las Islas de Calor Urbanas (ICU), son un fenómeno ocasionado por la sustitución de la vegetación por edificios, carreteras y otras infraestructuras que absorben el calor (EPA, 2008). En el presente capítulo se describen algunos de los trabajos realizados por diferentes autores a escala internacional, nacional y local para el caso de las ICU.

1.1 Ámbito internacional

Howard publicó en el año 1833, un libro donde describe la temperatura de la ciudad como un calor artificial inducido por la estructura de los edificios, la población atestada y el consumo de grandes cantidades de combustible, por lo cual, considera que la ciudad no delimita un microclima específico; para corroborarlo, analiza una serie de datos de temperatura obtenidos del Royal Observatory, así como mediciones realizadas por él mismo en diferentes puntos alrededor de la ciudad de Londres con ayuda de termómetros de *Six* (máximas y mínimas), durante un periodo de 25 años, principalmente en zonas donde la población, y por lo tanto las edificaciones, no eran abundantes, obteniendo que la ciudad era aproximadamente 1.579°C más caliente que el campo (Howard, 1833).

Para el año 1977, Lowry publica un artículo en la Universidad de Illinois sobre las estimaciones de los efectos que tienen las zonas urbanas en el clima regional, proponiendo métodos para la estimación matemática de las afectaciones causadas al clima a causa de los asentamientos urbanos; para realizar estas estimaciones utilizó parámetros climáticos (diferencia de temperaturas) y estadísticas (modelos matemáticos), que comparan el nivel de urbanización respecto de las variaciones identificadas en las variables del climáticas; realizó un comparativo entre diferentes metodologías, entre las que destacan los radios urbanos-rurales, las diferencias de temperatura entre las zonas urbanas y rurales, tendencias de datos a manera de series de tiempo y las diferencias semanales y diarias de las variaciones de temperatura. A partir del análisis de las metodologías, concluye que para elegir una

de ellas y aplicarla, es necesario considerar diferentes factores, como la escala en la que va a trabajarse y la disponibilidad de datos, además recomienda que los estudios se realicen en zonas homogéneas y características topográficas similares a estudios posteriores para validar los resultados (Lowry, 1977).

Por su parte, Moreno-García en el año de 1994, realiza un estudio estadístico de la diferencia entre las temperaturas mínimas diarias presentadas en el centro de Barcelona respecto de la zona del aeropuerto. Para este estudio se realizaron 5 trayectos en automóviles donde se instalan 2 termohigrómetros digitales, cada uno con los sensores apropiados, que registran lecturas de ambos parámetros en 117 puntos de observación, seleccionados por su representatividad de la diversidad de usos de suelo; además se utilizan datos de temperatura mínima y máxima diaria pertenecientes a dos observatorios, uno ubicado en el centro de Barcelona y el otro situado en el aeropuerto, obteniendo la estimación de la intensidad de la ICU para concluir que la presencia o falta de vegetación, la circulación del viento y la nubosidad en las dos zonas son algunos de los factores clave que inciden en la intensidad con la que se presenta la ICU, dado que sus resultados muestran que la diferencia de temperatura entre las dos locaciones excede los 8 °C (Moreno-García, 1994).

Para el año 1995, Camilloni realizó una investigación para la región norcentral de Argentina, cuyo objetivo era desarrollar y aplicar un modelo que permitiera la estimación de la intensidad de las ICU dentro de áreas geográficas densamente pobladas; el modelo propone que la temperatura media de un periodo de tiempo mayor o igual a un año puede ser descrita por una función que involucra las variables de latitud, longitud, y altura sobre el nivel del mar; para la verificación del modelo se seleccionaron cuatro años con mayor información recabada por estaciones meteorológicas y se realizaron experimentos con 16 estaciones, utilizados para verificar la capacidad del modelo para calcular la temperatura en lugares donde no se disponía de información. Finalmente, el modelo permitió calcular la temperatura media anual con un error cuadrático de $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ que permite la estimación de la intensidad media anual de la ICU con respecto de las zonas

rurales donde no se dispone de información de la temperatura como referencia (Camilloni, 1995).

En un estudio realizado para las ciudades del centro de Cuba en el año 2004, en el que Álvarez López analiza fenómenos relacionados con el Cambio Climático, se indaga sobre las ICU estableciendo una relación con la morfología de las zonas que albergan construcciones; pretende comprobar que, de acuerdo con el tamaño e importancia de la zona urbana, se puede valorar la existencia de dicho fenómeno, así como su relación con la morfología de la ciudad. Para lo anterior, caracteriza la zona de estudio y a su vez la morfología urbana, determina puntos de medición para los parámetros climáticos y después se realiza un procesamiento y análisis de los datos recopilados. Los resultados arrojaron que, para este caso, se registran diferencias térmicas de entre 3.5 y 5.5 °C entre la periferia y el centro de la ciudad, que delimitan un sector central más cálido en las zonas más urbanizadas y conforme esta urbanización disminuye hacia la periferia, las temperaturas registradas son menores (Álvarez-López, 2004).

Alcoforado y Andrade (2006) parten de la existencia de una ICU nocturna en la ciudad de Lisboa, que presenta problemas para ser determinada debido a la configuración de la ciudad pues los edificios se encuentran en los límites de ésta y no en el centro como es usual, por lo que estudian el fenómeno a partir de una técnica de regresión múltiple escalonada que establece una relación entre la temperatura del aire y los factores geográficos, posteriormente utilizan un sistema de información geográfica para representar patrones térmicos que ayudarán a definir la presencia y localización de la ICU. Concluyen que la intensidad de la ICU se encuentra en el rango de 0.5°C y 4°C entre áreas urbanizadas y zonas rurales (Alcoforado & Andrade, 2006).

Córdova Sáez (2011) realiza una investigación en la ciudad de Caracas, referente al impacto de las ICU en el ambiente y en la salud humana, para ello selecciona dos imágenes Landsat 7 ETM+, correspondientes al final del período húmedo en octubre de 2009 y al período seco en marzo del 2010, considerando el comportamiento de

variables climáticas como la precipitación y la radiación solar incidente para su elección. Además, recopila datos del Observatorio Cajigal de registros de precipitación con la finalidad de demostrar el mes más seco y el más lluvioso; a partir del tratamiento de los datos y las imágenes Landsat, se obtuvieron patrones de temperatura superficial determinando una anomalía positiva correspondiente a +10°C respecto de las imágenes obtenidas en marzo de 2010 y octubre de 2009 (Córdova-Sáez, 2011).

Sangines Coral (2013), desarrolla una metodología de evaluación para las ICU capaz de representar el fenómeno en un mapa de clima urbano de la ciudad de Zaragoza, mediante el uso de variables físicas y geoespaciales, con la finalidad de utilizarlo para identificar problemáticas energéticas y de planificación urbana, por ello se evalúa el estado actual de la ICU en la zona de estudio, se caracterizan los parámetros que la generan, así como estrategias de determinación y mitigación, concluye que el uso de imágenes satelitales complementadas por datos estadísticos puede ser una mejor opción para el estudio del fenómeno de las ICU, siempre y cuando se tome en consideración la escala en la que va a realizarse el análisis y la morfología de la superficie (Sangines Coral, 2013).

En el año 2014, Sarricolea Espinoza y Martín-Vide realizan un estudio enfocado en la zona metropolitana de Santiago de Chile, con el cual dan a conocer los patrones e intensidades de la ICU de superficie en la zona de estudio, a partir del análisis de imágenes satelitales Terra MODIS, elegidas de manera que las noches fueran despejadas para obtener el parámetro de temperatura, posteriormente se lleva a cabo un análisis de componentes principales para poder interpretar los patrones espaciales que resultan de los mapas generados a partir de las imágenes satelitales. Finalmente explican que la ICU de superficie en otoño equivale a una magnitud de 7.4°C, siendo la más elevada, mientras que la de verano equivale a 5.9°C, primavera 5.4°C e invierno 5°C (Sarricolea Espinoza & Martín-Vide, 2014).

En 2014, Yeh, Yang, Chou y otros publican un estudio realizado en la ciudad de Taichung, en la República de China, donde aplican técnicas de percepción remota

para el análisis de los efectos y la relación entre las temperaturas urbanas y las zonas industriales. Trabajan con imágenes satelitales Landsat 5 para los años 1995, 2009 y 2011, con este estudio calculan también la intensidad de la ICU, así como la distribución de sus efectos; como resultados obtienen que las zonas industriales son una de las principales causas de los efectos de las ICU y que para la zona de estudio las variaciones de temperatura oscilan entre 0.6 y 0.7 °C (Yeh, et al., 2014).

Durante la 9ª Conferencia Internacional de Clima Urbano y el 12º Simposio de Ambiente Urbano celebrado en Francia, Lokoshchenko, Korneva y otros (2015) presentan un estudio realizado en Moscú, Rusia, donde se analiza el rango vertical de la ICU sobre la ciudad, hace referencia a la existencia de la misma en la capa de aire del suelo durante el día y una “Isla Fría” durante la noche, para demostrarlo, realizan perfiles de temperatura hasta los 500 metros dentro y fuera de la ciudad, sus resultados los llevan a señalar la existencia del fenómeno de las ICU en la ciudad de Moscú, pero por la noche cambian el término a Isla Fría, pues existe una intersección de las corrientes de aire de las zonas rurales que modifica los perfiles de temperatura nocturnos (Lokoshchenko, et al., 2015).

En el año 2016, Chang realiza un estudio sobre la cuenca de Taipéi, donde a partir del análisis espacial de las ICU comprueba el efecto negativo que tienen sobre el medio ambiente. Su estudio se basa en la evaluación de imágenes Landsat 8, EMT+ y TM del periodo 1990 a 2015, mediante el uso de datos de la temperatura superficial durante los solsticios de verano de cada año, con los cuales realiza un análisis del patrón de espacio-tiempo y evolución de las características de las ICU, demostrando que la temperatura en la cuenca varía de 34° C en las zonas urbanas, mientras que en el área cercana al río Tamsui y zonas montañosas la temperatura era de 22° C, es decir, 12°C más baja, cuestión que atribuye a la transpiración de la vegetación, al dosel de la cobertura forestal y a la elevación de esas zonas (Chang, 2016).

Soberón-Forsberg y Obregón-Párraga publican en el año 2016 un estudio realizado en la ciudad de Lima Metropolitana, en el cual se plantea el uso de imágenes

Landsat 5TM para la identificación del fenómeno de las ICU en la región, dada la falta de estaciones meteorológicas. Analizan datos de diferentes meses durante los años de 2008, 2009, 2010 y 2011. A partir de estos datos identifican 7 ICU en las zonas industriales y 3 micro-ICU en las zonas urbanas. (Soberón-Forsberg & Obregón-Párraga, 2016)

En la localidad de Kennedy, Bogotá; Meneses Figueroa e Iral Fiquitiva (2017) realizan un estudio sobre las variables que influyen en la generación de ICU, las variables utilizadas para esta investigación son: temperatura, crecimiento urbano, cantidad de vegetación, albedo superficial, consumo de energía eléctrica y la correlación entre los contaminantes atmosféricos y la urbanización respecto de la temperatura. Para realizar el análisis de las variables utilizan sistemas de información geográfica y estadística, como resultado, obtuvieron mapas de las variables y se determinó que las altas temperaturas se debían a la presencia de materiales con bajos niveles de albedo, ausencia de vegetación y a la urbanización (Meneses-Figueroa & Iral-Fiquitiva, 2017).

Para el año 2019, Chakraborty y Lee, desarrollan un algoritmo con el que estiman la intensidad de las ICU a escala global, tomando como referencia las principales ciudades de Europa, América y Asia, utilizan imágenes MODIS (Espectro Radiómetro de Imágenes de Resolución Moderada) para calcular la intensidad de las ICU en más de 9,500 zonas urbanas, y confirmando sus resultados con estudios previos de algunas de ellas. Encuentran que existen diferentes patrones para el comportamiento de las ICU, y que este depende de la ubicación, pues en las zonas de clima árido la ICU es más elevada durante la noche en comparación con el día y, por otro lado, la variabilidad diurna en la ICU es más alta para la zona de clima ecuatorial y más baja para la zona árida (Chakraborty & Lee, 2019).

1.2 **Ámbito nacional**

Por otra parte, dentro de la República Mexicana se han realizado estudios sobre las ICU, siendo algunos de ellos los siguientes.

Tejeda Martínez y Acevedo Rojas (1990) realizan una investigación para establecer una relación entre el grado de urbanización en Xalapa, Veracruz y las alteraciones climáticas del microclima, el estudio se desarrolla durante 8 meses con registros de temperaturas y lluvia extrema y su comparación con series de tiempo (1923-1986) de datos de los mismos parámetros, con esto se demuestra que hay un incremento de temperatura de 2°C relacionado con la disminución de vegetación y el desarrollo de la zona urbana (Tejeda-Martínez & Acevedo-Rojas, 1990).

En el año 1992, Jáuregui Ostos retoma los datos recabados por el climatólogo Manuel Moreno Anda para analizar el contraste de temperaturas entre el centro de la Ciudad de México con respecto de la periferia (Tacubaya), lo anterior con base en datos de temperaturas mínimas y máximas registradas por el climatólogo en los observatorios que se encontraban en Palacio Nacional y en el Observatorio Astronómico de Tacubaya durante el día y la noche durante el periodo 1895 a 1896, hace la comparación de datos obtenidos del día y la noche, además resalta la diferencia de temperatura media anual entre el centro de la ciudad y la periferia, que entonces era equivalente a 1.4°C más elevada en el centro de la ciudad (Jáuregui-Ostos, 1992).

Posteriormente, en el año de 1995 Jauregui Ostos publica un artículo donde se describen los cambios en el clima en la Ciudad de México a partir de datos históricos de temperatura del aire, entre 1900 y 1990, con los que demuestra que el crecimiento de las zonas urbanas tiene un efecto negativo en la temperatura, pues se ha elevado 1.7°C en un periodo de 90 años (Jáuregui-Ostos, 1995).

Después, en el año 2000 Jauregui Ostos publica un trabajo donde habla sobre el clima de la Ciudad de México, y cómo inferir el comportamiento del clima en épocas anteriores tales como el periodo azteca y la colonia mediante registros históricos y

la descripción del entorno en la literatura existente, para realizar una comparación entre las condiciones climáticas de épocas anteriores con respecto a los datos reportados por las estaciones meteorológicas recientes, en su caso, obtiene como resultado el panorama general de las condiciones climáticas de la zona de estudio para épocas sin registros de datos numéricos, y las utiliza para realizar una evaluación de la evolución del clima a lo largo de periodos grandes de tiempo en los que no se cuenta con registros históricos de variables climáticas (Jáuregui-Ostos, 2000).

El propósito de un estudio de Contreras Cardosa y otros (2008), es determinar la presencia del fenómeno de las ICU en Ciudad Juárez, para ello realizan la comparación de temperaturas que se presentan en una zona urbana con una semirrural, mediante el uso de datos de temperatura de cinco estaciones de monitoreo, elaboran gráficas para realizar la comparación de la información correspondiente a enero-febrero y junio-septiembre; concluyen que el fenómeno se presenta con una magnitud de 6°C (diurno) y 7°C (nocturno) (Contreras-Cardosa, et al., 2008).

En 2008, Villanueva-Solís y otros, realizan un estudio con la finalidad de valorar la mitigación del fenómeno de las ICU para la ciudad de Mexicali, planteándolo como una estrategia de planeación urbana sustentable y mitigación al cambio climático; utilizan un análisis de usos del suelo y establecen posibles estrategias de mitigación, siendo estas la reforestación, azoteas frescas y las azoteas verdes. Concluyen que la modelación de datos es una herramienta útil para generar escenarios y propuestas de mitigación del fenómeno de las ICU y los posibles cambios que estas estrategias pueden tener a futuro, recalcando un estimado de reducción de hasta 8°C de la temperatura para el año 2080 (Villanueva-Solís, et al., 2013).

Para el año 2014, Fuentes Pérez realiza una investigación en Tampico, con el propósito de resaltar la influencia de las acciones humanas en los microclimas de los diferentes hábitats, hace referencia a las ICU como el fenómeno que ocasiona estas alteraciones a los diferentes microclimas, pues las altas temperaturas no sólo

generan el estrés térmico que perturba a la comodidad de la población, sino que facilitan la contaminación fotoquímica de la atmósfera. También realiza un análisis macro climático histórico para determinar las variaciones térmicas producidas por las ICU mediante la generación de isotermas; los datos de temperatura se registran cada 10 segundos con ayuda del sensor HOBO ProV2; a su vez realiza trayectos en automóvil con estos sensores para realizar el muestreo de datos de temperatura, empleando la metodología sugerida por Jáuregui (1979). A partir de la aplicación de la metodología, concluye que existe una relación entre las ICU, las zonas con escasa vegetación y las que poseen un índice de refracción bajo (Fuentes-Pérez, 2014).

En Mexicali, Baja California, Casillas-Higuera y otros (2014), llevan a cabo un estudio durante los años 2002 a 2005, con la finalidad de aplicar, comparar y validar la técnica del modelado de datos relacionados con la intensidad y hora en que ocurre el fenómeno de las ICU. A partir de datos de cuatro estaciones meteorológicas y con ayuda del software Stella, realizan una simulación de datos de temperatura tomadas en zonas urbanas y tomándolos como referencia, modelan isotermas mediante la división del modelo en subsistemas. Con lo anterior se genera un mapa de distribución de temperaturas, el cual se analiza con ayuda del software Idrisi para observar las zonas que abarcaba la distribución de temperaturas, encontrando que las más elevadas se posicionaron en las zonas más urbanizadas con un promedio de temperaturas máximas de entre 5.4°C y 5.2°C (Casillas-Higuera, et al., 2014).

Hernández Godínez (2017) realiza una investigación en la Delegación Venustiano Carranza, ubicada en la Ciudad de México, cuyo propósito es caracterizar los efectos y vulnerabilidad de la población ante el fenómeno de las ICU en el área de estudio, realiza un análisis multimétodos, compuesto por un método cuantitativo en el cual se utiliza la observación participante, y otro cuantitativo para la recopilación de datos meteorológicos. Para la observación participante realiza entrevistas semiestructuradas con la finalidad de conocer la vulnerabilidad, mitigación y adaptación a las ICU desde el punto de vista de los habitantes de la delegación,

aplica las entrevistas en puntos clave de la zona. A partir de la metodología, concluye que la población de la zona de estudio no tiene conocimientos sobre la problemática de la ICU, por lo cual son vulnerables ante los efectos del fenómeno, destacó que los principales grupos vulnerables ante el fenómeno son las personas que viven en asentamientos irregulares, así como niños y ancianos (Hernández-Godínez, 2017).

Mireles Arellano realiza en 2018 un análisis de las Islas de Calor en la Ciudad de México, a partir del denominado efecto cacerola generado por las condiciones geomorfológicas de la zona de estudio, para realizar esta investigación toma en cuenta datos de crecimiento poblacional de 1900 a 2015, con la finalidad de delimitar la mancha urbana y bajo la hipótesis de que, a mayor población, mayor demanda de edificios, estas zonas tendrían que generar ICU. Toma en cuenta también la radiación, el albedo y como referencia los años más cálidos registrados en datos históricos. El proceso se realiza con imágenes satelitales que brindan la información requerida de los periodos elegidos para el trabajo, con la limitante de que las tomas del satélite Landsat son en determinados momentos del día y no se realiza el comparativo con datos nocturnos. Concluye que en la Ciudad de México existe el fenómeno de las ICU, principalmente por la escasez de áreas verdes (Mireles-Arellano, 2018).

1.3 Ámbito local

Para el caso de Toluca, Jáuregui Ostos (1979), realiza un estudio sobre las ICU, donde el objetivo principal es determinar los contrastes de temperatura entre la ciudad y las zonas rurales, así como la estimación de la intensidad de la ICU en la zona, este estudio se realiza por medio de observaciones y análisis de los datos de temperatura recopilados durante 2 recorridos en un automóvil durante la noche del 2 y la tarde del 3 de Febrero de 1977, los registros se realizan a 1.20 metros sobre el pavimento mediante el uso de un psicrómetro posicionado en el exterior del parabrisas y los datos registrados por un termómetro seco y uno húmedo a cada kilómetro del recorrido; también se mide la intensidad y dirección del viento, para plasmar los datos realiza gráficas de variación térmica, así como mapas de isotermas, obtienen que los contrastes térmicos de 5°C se relacionan con la extensión de la mancha urbana respecto de las zonas rurales (Jáuregui-Ostos, 1979).

Morales Méndez y otros (2007), realizan un estudio en la ciudad de Toluca con la finalidad de caracterizar la distribución espacial de la ICU, que se presenta en la zona, toman en cuenta datos de temperatura registrados por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), a lo largo de 24 horas de dos días seleccionados (15 de julio de 2004 y 13 de enero de 2005) en la ciudad de Toluca. También utilizan datos de presión atmosférica, dirección y velocidad del viento, así como humedad relativa. A partir de ellos realizan isotermas cada medio grado centígrado, para poder identificar la ICU, y comparan estos datos con todas las estaciones de la RAMA en la zona de estudio para el mismo día y hora. A partir de lo anterior, relacionan el fenómeno de la ICU con el incremento de las precipitaciones y de partículas contaminantes en Toluca, concluyen que el cambio de uso de suelo de la ciudad es uno de los factores que contribuye a las alteraciones en los rangos de temperatura que arrojó la investigación respecto del centro de la urbanización con la periferia (Morales-Méndez, et al., 2007).

Para el año 2011, Romero Dávila y otros realizan un estudio sobre la identificación de las ICU de verano e invierno en la ciudad de Toluca, para ello identifican nueve estaciones meteorológicas alrededor de la zona de estudio para obtener datos durante un día característico de verano y otro de invierno, considerando las condiciones atmosféricas de cielo despejado, velocidad del viento menor a 2 m/s, estabilidad atmosférica y que las diferencias de altitud no rebasaran los 100 metros. Identifican una ICU de verano e invierno, cuya ubicación corresponde al área de mayor infraestructura urbana con materiales que absorben el calor, así como una gran concentración de vehículos, que se caracteriza por la falta de vegetación y la escasez de cuerpos de agua (Romero Dávila, et al., 2011)

Por su parte Rivera, Antonio-Némiga y otros (2017), realizan un estudio en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca donde realizan un análisis comparativo de la ICU a lo largo de 2014, usando 12 estaciones meteorológicas dispersas en las zonas rurales y urbanas de la zona de estudio, así como imágenes satelitales pertenecientes al Landsat 8, concluyen que la ICU nocturna alcanza una intensidad de 6°C en otoño, mientras que la ICU diurna tiene una máxima intensidad de 4°C durante el verano y el otoño (Rivera, et al., 2017).

Capítulo 2

Marco teórico



Capítulo 2. Marco Teórico

En el presente capítulo se tratarán los principales conceptos relacionados con las ICU, así como factores que contribuyen a su formación, con la finalidad de establecer un marco de referencia que permita la comprensión del tema.

2.1 Clima

Landsberg y Jacobs (1951), consideran que el clima es una estadística colectiva de condiciones individuales (temperatura, precipitación, viento, humedad del tiempo atmosférico), por lo que la climatología se convierte en el análisis científico de estos parámetros para un propósito funcional. El clima también puede ser entendido como el resultado de observaciones periódicas recopiladas durante varios años y que son sometidas a un análisis estadístico; Köppen lo define como el estado medio y proceso ordinario del tiempo para un lugar determinado (Ayllón, 2003).

La Organización Meteorológica Mundial (WMO por sus siglas en inglés), define al clima como las condiciones climáticas promedio de un área durante un largo periodo de tiempo; menciona que éste se determina mediante un cálculo de las condiciones meteorológicas durante un periodo de al menos treinta años (OMM, 2011).

2.1.1 Meteorología

La meteorología puede entenderse como el campo de estudio que se encarga de analizar la estructura, estado y comportamiento de la atmósfera, en especial de los fenómenos de tipo atmosférico que inciden en la configuración del clima de una región (Ayllón, 2003); este estudio se basa en el análisis de las magnitudes correspondientes a los elementos que conforman el clima durante espacios de tiempo definidos (Rodríguez Jiménez, et al., 2004).

Se usa el término tiempo atmosférico para referirse a las condiciones atmosféricas en un periodo de tiempo que puede variar de días a semanas, que condiciona las actividades cotidianas de la población y que usualmente es el resultado de las variaciones de temperatura de un lugar a otro (Nagarajan, 2009) y a diferencia del

clima, éste no tiene efectos evidentes sobre el relieve. El tiempo atmosférico, se hace uso de variables como lo son la temperatura, precipitación, viento, humedad y presión atmosférica para evaluar el estado del tiempo atmosférico, durante periodos más cortos de tiempo.

2.1.2 Atmósfera

Para entender cómo funciona el clima y la meteorología, debemos saber que la atmósfera es la capa compuesta de gases que rodea y permite el desarrollo de la vida en la Tierra, y que en conjunto con la dinámica que se produce en la superficie, da origen al sistema climático que conocemos (OMM, 2011). La atmósfera está compuesta por diferentes gases, de los cuales el nitrógeno es el más abundante (78.084%), seguido del oxígeno (20.946%) y pequeñas cantidades de argón (0.93%), neón (0.00018%), helio (0.0005%), hidrogeno (0.00006%) y xenón (0.000009); además de algunos gases variables como el vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, ozono y partículas suspendidas (Ahrens, et al., 2012).

Además se encuentra conformada por una estructura vertical de capas que se distinguen principalmente por sus perfiles de temperatura (Imagen 2.1); la primera capa es llamada troposfera y en ella tienen lugar los procesos que dan origen al tiempo atmosférico, esta tiene un espesor de aproximadamente 11 kilómetros desde la superficie terrestre; la estratósfera es la siguiente capa y se diferencia de la troposfera gracias a una capa límite denominada tropopausa, en la estratósfera se encuentra la capa de ozono, que funciona como un mecanismo de absorción de radiación solar, por lo que esta capa se considera importante para la regulación del clima; a continuación se encuentra la estratopausa y enseguida la mesosfera, en esta capa la presión atmosférica es baja y la temperatura que alcanza es la más fría de la atmósfera, en este caso, la mesopausa da paso a la termosfera, que a diferencia de la capa anterior, es una capa caliente donde las moléculas de oxígeno absorben energía solar, provocando que el aire mantenga una temperatura elevada.

Se considera también una capa final, exósfera, donde la atmósfera se relaciona con el espacio y es en este lugar donde los satélites orbitan la Tierra (Ahrens, 2011).

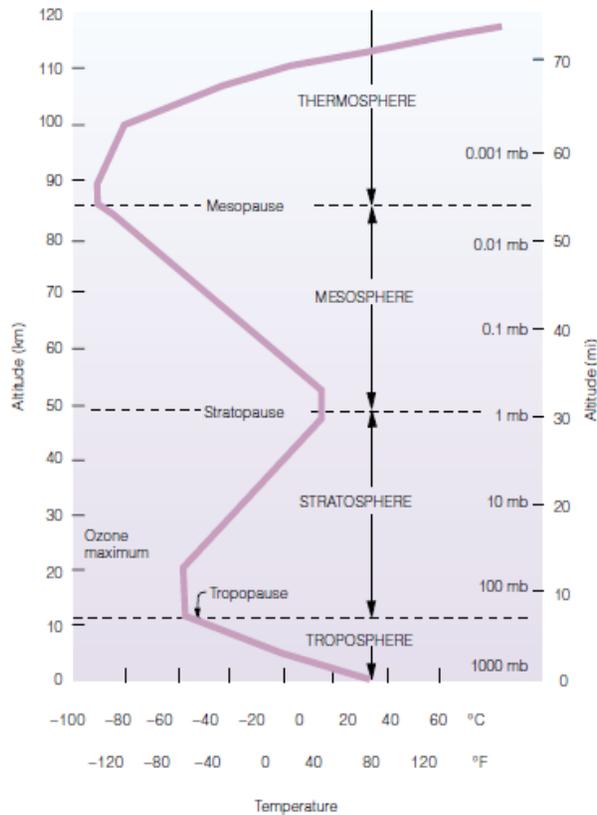


Imagen 2.1 Estructura vertical de la atmósfera.
Fuente: Ahrens, 2011, pág. 9.

2.1.3 Elementos del clima

Los elementos del clima son producto de las relaciones entre diferentes fenómenos de origen físico, químico y biológico (Rivera-Olmos, et al., 2011), Ayllón (2003) los clasifica en elementos geodinámicos (temperatura, presión y viento) y acuosos (humedad, nubosidad y precipitación); estos permiten describir el tiempo atmosférico en un lugar y momento determinado.

2.1.3.1 Elementos geodinámicos

La temperatura es definida como una magnitud relacionada con la rapidez del movimiento de las partículas que constituyen la materia, pues cuanto mayor agitación presente, mayor será la temperatura (Rodríguez Jiménez, et al., 2004); es

vista también como un indicador del nivel de calor de un cuerpo, mismo que se transmite a través de la conducción, convección y/o radiación (Andrades Rodríguez & Muñoz León, 2012). En climatología, la temperatura es utilizada como uno de los parámetros más representativos del clima o estado del tiempo de una región, por lo general este parámetro se obtiene a partir de mediciones realizadas en estaciones meteorológicas de forma diaria, semanal, mensual y anual.

Se entiende por presión atmosférica aquella fuerza ejercida por el aire sobre una superficie, misma que se despliega en todas direcciones, pero con diferente magnitud, por la superficie de la Tierra (Ayllón, 2003). La presión atmosférica varía en función de la temperatura, humedad y la altitud, por lo que es diferente dependiendo de la distribución horizontal de la superficie (Andrades Rodríguez & Muñoz León, 2012).

El viento es un desplazamiento de aire ocasionado por la diferencia de presión de un lugar a otro y está definido por su dirección y velocidad (Andrades Rodríguez & Muñoz León, 2012). Como variable climática, esta variable se analiza mediante la frecuencia y dirección de los principales flujos, la velocidad y estructura vertical de la masa de aire; el viento es la única variable que requiere de un estudio escalar y vectorial para su comprensión, pues es necesario determinar la procedencia y destino de las masas de aire, así como la fuerza o presión que ésta ejerce sobre la superficie que recorre (Fernández García, 1996).

2.1.3.2. Elementos acuosos

Ayllón (2003), menciona que la humedad es la cantidad de vapor en el aire y precisa que hay tres maneras de referirse a este parámetro de manera cuantitativa; la humedad absoluta, específica y relativa. La primera se refiere al vapor de agua que se encuentra en un determinado volumen de aire; la humedad específica se refiere a la medida en gramos del vapor de agua en un kilogramo de aire húmedo (Fernández García, 1996).

Por otra parte, la nubosidad se define como la proporción de nubes que se encuentran en determinado espacio de la atmósfera inmediata y que se forman a partir de la condensación del vapor de agua (Andrades Rodríguez & Múñez León, 2012).

La precipitación es definida como las partículas de agua en estado sólido o líquido que se forman en la atmósfera y que caen a la superficie de la Tierra durante un periodo de tiempo (Nagarajan, 2009), también se puede entender como el resultado de los procesos de condensación de agua que al alcanzar el tamaño suficiente caerán (Andrades Rodríguez & Múñez León, 2012). Fernández (1996) menciona que las diferencias climáticas regionales se establecen en relación con esta variable.

2.1.4. Factores del clima

Rivera-Olmos et al. (2011), precisan que existen factores que influyen en la configuración del clima en una región, estos son la altitud, latitud, las corrientes marinas y la disposición de tierras y mares; Ayllón (2003), concuerda con la influencia de estos factores en las variables o elementos de clima y agrega también la cantidad de radiación que llega a la superficie terrestre y la cantidad de vegetación de la que dispone una región.

2.1.4 Clasificación del clima

De acuerdo con lo mencionado en la interpretación de climas de INEGI, Wladimir Köppen establece en el año 1936, una clasificación para los diferentes climas del mundo y los agrupa en cinco tipos a los cuales representa con las primeras letras del abecedario: A (cálidos húmedos), B (secos), C (templados húmedos), D (frío boreal de inviernos intensos) y E (polares o de grandes alturas) (INEGI, 2005). Debido a las marcadas diferencias de la descripción de climas de Köppen, Enriqueta García (2004), realiza una adaptación de la clasificación de Köppen a las características del clima en México; agrega tipos y subtipos de climas que permiten establecer de manera puntual las características climáticas de cada región del país.

2.1.5 Escalas del clima

El clima es un elemento que cambia conforme a los diferentes parámetros que rigen su comportamiento, dichos cambios se producen tanto a escala vertical como horizontal, dependiendo de factores geográficos y el tiempo en que se producen las variaciones de los elementos del clima; es por ello que las escalas del clima permiten analizar el comportamiento del clima y el tiempo atmosférico en determinadas extensiones superficiales y un espacio temporal, Fernández García (1996), expone la clasificación climática de Arlery (1973), quien considera que los diferentes tipos de clima pueden ser agrupados de acuerdo con la extensión de la zona de estudio y los clasifica en las cuatro categorías siguientes:

- a) Climas zonales o macroclimas: engloba áreas de extensión superior a 2000 kilómetros cuadrados cuyos rasgos físicos se repiten de manera constante, esta escala se basa en la percepción de la distribución global de los elementos del clima.
- b) Climas regionales o mesoclimas: áreas de entre 200 y 2000 kilómetros cuadrados, se distingue por contener barreras orográficas que separan masas de aire diferentes, por lo cual hay una variación significativa de algunos elementos climáticos.
- c) Climas locales: áreas que presentan rasgos similares y que dependen de los climas regionales, muestran diferencias importantes dependiendo de la altitud, orientación, el tipo de cubierta vegetal y su proximidad o lejanía con respecto del mar.
- d) Microclimas: son espacios reducidos usualmente medidos desde centímetros cuadrados a pocos metros cuadrados cuyos rasgos están definidos por los factores del entorno próximo como los usos de suelo y los diferentes tipos de materiales, el ejemplo más representativo es el clima urbano a escala de calle.

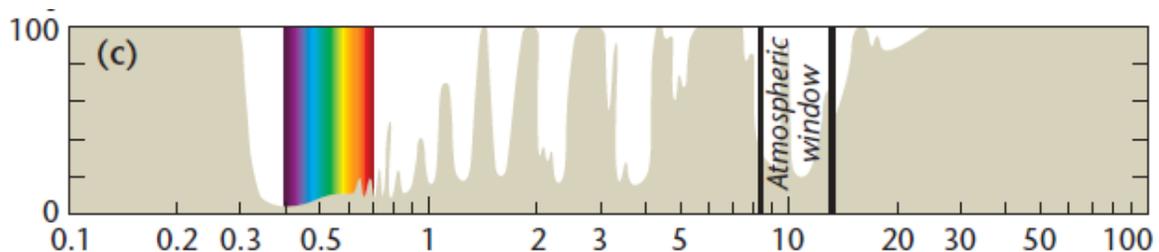
2.2 Radiación y temperatura

2.2.1 Radiación

La radiación puede ser definida como aquella energía que emiten todos los cuerpos que poseen una temperatura superior a 0 grados Kelvin (-273°C); esta se propaga a través de ondas electromagnéticas, cuya frecuencia y longitud varían en función de la temperatura; la energía radiante que recibe la Tierra proviene del Sol y se descompone en diferentes formas, dando origen al espectro electromagnético (Ayllón, 2003).

En palabras de Fernández García (1996, pág. 63), “... *todas las variables climáticas dependen, directa o indirectamente, de la radiación y es un parámetro fundamental para el cálculo de los balances de agua y de los principales índices bioclimáticos.*”

Es importante mencionar que, a lo largo y ancho del planeta, la radiación se presenta en diferentes magnitudes, y éstas dependen de la latitud en la que se analice, la hora del día y la inclinación del eje terrestre (Fernández García, 1996).



*Imagen 2.2 Espectro electromagnético.
Fuente: Oke, et. al., 2017, pág. 124.*

Por su parte, el espectro electromagnético (imagen 2.2) se clasifica en diferentes rangos, entre los que se encuentran: ultravioleta, luz visible, infrarroja y microondas (Rodríguez Jiménez, et al., 2004). De acuerdo con Oke, et.al. (2017), el Sol al poseer una temperatura de aproximadamente 5780 K, emite radiación en un rango de 0.1 a 3 μm (radiación de onda corta o radiación solar), mientras que el sistema Tierra – Atmósfera tiene una temperatura media de 288 K, por lo que emite radiación en un rango de 3 a 100 μm (radiación terrestre, de onda corta o infrarroja térmica).

2.2.2 Albedo

El concepto de albedo se entiende mediante la teorización de la Ley de Planck, la emisividad descrita por la constante de Stefan-Boltzmann y el cuerpo negro; la primera se refiere a la radiación electromagnética que emite un cuerpo a cierta temperatura y frecuencia de onda; mientras que la emisividad (capacidad de un cuerpo para emitir radiación), se describe como la densidad del flujo de energía que emite un cuerpo e indica su eficiencia, sabiendo que si la constante de Stefan-Boltzmann es igual a 1.0, entonces el cuerpo es un emisor perfecto, es decir, un cuerpo negro. Por lo que podemos definir a un cuerpo negro como un objeto que absorbe toda la energía que es emitida hacia él y que es capaz de emitirla por completo en respuesta. Por lo tanto, el albedo funciona como un cuerpo imperfecto que recibe cierta cantidad de energía radiante y en respuesta emite un porcentaje de esta, es decir, describe el comportamiento de un cuerpo que no es eficiente (Oke, et al., 2017).

Ayllón (2003), menciona que el albedo es el porcentaje de energía solar que se refleja al espacio y cuya magnitud varía dependiendo el material de la superficie que la reflecta; describe que aproximadamente la Tierra tiene un albedo de 40%, pues el 17% de la energía que se recibe es absorbida por la atmósfera y el 43% restante es absorbida por la superficie. Schanda (1986), menciona que el porcentaje de albedo varía dependiendo de la superficie, por lo que enlista una serie de valores del albedo aproximado para algunos materiales (Tabla 2.1), con los que podemos identificar que los cuerpos blancos (nieve) reflejan una mayor cantidad de energía que los cuerpos negros (superficies urbanas, suelos arables, etc.).

Superficie	Porcentaje de albedo
Nieve fresca	~ 75 – 90
Suelo (claro)	~ 25 – 30
Suelo (arable, oscuro)	~ 5 – 15
Pasto	~ 5 – 30
Cultivos verdes	~ 5 – 15
Bosque	~ 5 – 10
Granito	~ 31
Superficie urbana	~ 6 – 20

Agua	(Dependiendo de los grados de inclinación del eje terrestre respecto al Sol)
90°	~ 2
60°	~ 2.2
30°	~ 6
20°	~ 13.4
10°	~ 35.8

Fuente: elaboración propia a partir de Schanda (1986)
Tabla 2.1 Porcentaje de albedo para diferentes superficies.

2.2.3 Transferencia de calor

El calor puede entenderse como la energía que se transmite de un cuerpo a otro, debido a que existe una diferencia de temperatura entre ambos, se sabe que cuando la temperatura de un cuerpo se incrementa, la energía que posee también lo hace, por lo que, si este cuerpo se pone en contacto con otro de menor temperatura, se produce un intercambio de energía que puede ser llamada calor (Smith & Smith, 2007). Existen tres formas mediante las cuales se transmite el calor de un cuerpo a otro u otros, y son definidas por Smith y Smith (2007) como:

- a) **Conducción:** la forma en que se transfiere energía mediante el movimiento de las moléculas entre dos o más objetos que mantienen un contacto directo.
- b) **Convección:** se refiere a la transferencia de energía que se produce con el movimiento de la masa que constituye a un cuerpo, es decir, existe un proceso mediante el cual la porción de la masa que está en contacto directo adquiere calor y su densidad baja, por lo que tiende a subir y es remplazada por masa con una menor cantidad de calor.
- c) **Radiación:** esta forma de transferencia no requiere de un medio que intervenga para la cesión de energía, pues en este caso, la energía se emite a través de ondas.

2.2.4 Temperatura

La temperatura, entendida como la magnitud con la que se mide la cantidad de energía cinética de las partículas que conforman un cuerpo (Rodríguez Jiménez, et al., 2004), es una de las variables que se toma en cuenta para la caracterización del clima de una región determinada, por lo que es importante enfatizar que la

temperatura del ambiente se mantiene en constante cambio, y por ello se realizan regímenes térmicos que ayudan a entender su comportamiento con respecto al ciclo diario o anual de la radiación (Andrades Rodríguez & Múñez León, 2012).

Fernández García (1996), menciona dos variantes, que se basan principalmente en el análisis de la amplitud térmica, definida como la diferencia entre la temperatura máxima y mínima durante ciertos periodos de tiempo, y en la que influyen aspectos geográficos como la cercanía al mar y el relieve. Estas variantes son las siguientes:

- a) Régimen diario: se considera la temperatura máxima registrada antes del paso del sol por su meridiano y la temperatura mínima registrada antes de la salida del sol; y puede ser modificado por masas de aire cálidas o frías y la nubosidad existente.
- b) Régimen anual o estacional: toma en cuenta la temperatura máxima registrada durante el solsticio de verano y la temperatura mínima ocurrida durante el solsticio de invierno.

De igual manera, se cuenta con representaciones gráficas que ayudan a entender las diferencias térmicas que existen durante momentos específicos en el tiempo (Fernández García, 1996), algunas de ellas son las siguientes:

- a) Diagrama cartesiano: se utiliza el plano cartesiano para representar la magnitud de la temperatura máxima, mínima (absolutas) y media ocurrida durante cada mes durante un año.
- b) Diagrama polar o termograma: corresponde a una gráfica de doce sectores (uno por mes), donde se registran las temperaturas medias mensuales ocurridas durante un año, de manera que se intente representar las cuatro estaciones del año.
- c) Mapa de isotermas: se realiza mediante valores de temperaturas medias (usualmente) registradas en puntos geolocalizados, durante un momento específico del tiempo.

2.3. Clima urbano

El clima urbano es definido como un clima regional (áreas entre 200 y 2000 km², delimitado por barreras orográficas) modificado y dentro del cual pueden distinguirse áreas climáticas diferenciadas en función del uso de suelo, la orientación de la ciudad, la anchura de las calles, entre otros elementos; esta definición está en función de la comparación del entorno próximo de una ciudad, tomando en cuenta las variables del clima regional y los factores urbanos que las modifican (Fernández García, 1996).

Oke (2017), menciona que los efectos de la urbanización en el ambiente pueden presentarse en mayor o menor medida en cada ciudad, y mediante el clima urbano se describe y cuantifica el impacto del crecimiento urbano sobre los procesos atmosféricos, así como el aporte de las ciudades a los cambios en el clima, la composición atmosférica y los efectos que estas alteraciones tienen sobre la infraestructura, salud y seguridad en las ciudades.

2.3.1 Ecosistema urbano

Para entender el comportamiento del clima urbano, es necesario considerar primero a la ciudad como un ecosistema, que está conformado por elementos bióticos (vegetación, animales y personas) y abióticos (clima, edificaciones, industrias, etc.) existiendo, por lo tanto, cinco esferas en las que se desarrollaran diferentes procesos, representados por Oke, et. al., (2017), de forma lineal (Imagen 2.3); en el cual la presencia humana altera las condiciones naturales del ecosistema previo, por lo que se deberán considerar factores socioculturales, políticos y económicos para su estudio. Además, y dado que el clima es un sistema abierto, se considera importante el análisis del metabolismo urbano, concepto que involucra los flujos de materia y energía entre las zonas urbanas y las zonas rurales que, por lo general, rodean la periferia de una ciudad (Oke, et al., 2017).

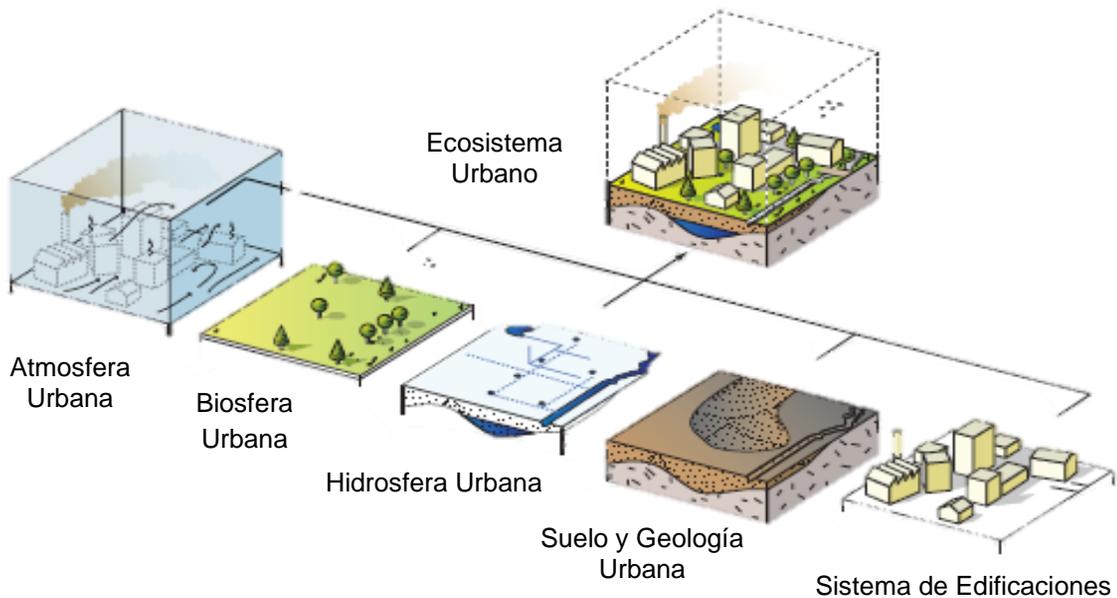


Imagen 2.3 Componentes de un ecosistema urbano.

Fuente: Oke, et. al., 2017, pág. 124.

Oke, et al., (2017), explican los componentes del ecosistema urbano, en donde la atmósfera de las zonas urbanas se encuentra bajo presión de diferentes factores que la modifican, estos se encuentran dentro de dos grupos: los cambios en la superficie y las emisiones de origen antropogénico; al primer aspecto se asocian la forma de la mancha urbana, el tipo de materiales que se utilizan en las edificaciones y caminos, los diferentes usos de suelo dentro de las zonas urbanas, y la estructura

tridimensional de las edificaciones. Por otro lado, las emisiones antropogénicas, incluyen el vapor de agua y partículas contaminantes resultado del metabolismo urbano.

Así mismo, la biosfera dentro del sistema urbano se ve afectada por la expansión acelerada de la cantidad de edificaciones, lo que representa un decrecimiento principalmente en la cantidad de vegetación dentro de los espacios urbanos; lo que en ocasiones repercute en la degradación de la calidad ambiental de la zona en cuestión, lo cual a su vez incide en la supervivencia de las especies de fauna salvaje que habitaban el lugar previo a su transformación (Oke, et al., 2017).

Para el caso de la hidrosfera dentro de las zonas urbanas, Oke, et. al., (2017), expone que al incluir edificaciones, los procesos de infiltración del agua al subsuelo se ven afectados a causa del asfalto y el concreto que cubre la superficie de las ciudades, lo cual, en conjunto con las modificaciones que sufre el terreno, repercute en los patrones y tasas de drenaje superficial y subterráneo, aumentando la proporción de la escorrentía superficial que se traduce en el aumento del riesgo a inundaciones y disminuye a su vez la cantidad de agua que se encuentra disponible en el subsuelo.

En el caso del suelo y la geología del lugar, Oke, et. al., (2017), menciona que estos pueden verse seriamente alterados debido al proceso de edificación y la forma en la que se desarrolle una ciudad, pues usualmente se realiza una preparación previa para la construcción de vialidades, casas y edificios, que alteran la estructura original de las rocas y suelos que se encontraban en el sitio, deformando la estructura original y ocasionando cambios en la fertilidad del suelo y la hidrología del ecosistema urbano.

Finalmente, el autor explica que la configuración del sistema de edificaciones tiene un peso importante en el sistema que compone el clima urbano, pues la disposición de los parches de vegetación puede marcar la diferencia en las temperaturas que se registran durante un día soleado, pues se mantienen relativamente fríos dado que la vegetación utiliza la energía solar para evaporar el agua. Además, las

dimensiones de los edificios y el espacio entre ellos, determinado por el tamaño de las calles, influye en la determinación de su albedo, rugosidad, los patrones de intercambio radiativo y el flujo de aire entre las edificaciones.

2.3.2 Balance de energía

La atmósfera urbana puede ser definida en función de la capa límite y el dosel urbano, la capa límite se refiere a la capa de mezcla (turbulenta), que se genera por la rugosidad de la superficie y la circulación del aire que se calienta en contacto con el suelo, abarca desde el techo de los edificios y las puntas de los árboles hasta un máximo de kilómetro y medio en la tropósfera (Fernández García, 1996). Por su parte, la capa de dosel comienza directamente en la superficie y comprende hasta la máxima altura del techo de los edificios y árboles que integran el área urbana. Esta distinción entre la capa límite y el dosel urbano permite evaluar las interacciones de la energía en la superficie, en función de las diferencias de los usos de suelos, las características de la superficie y los niveles de actividad humana (Imagen 2.4) (Oke, 1987).

En las capas mostradas en la Imagen 2.4 existe un sistema de transferencia de energía que determina la configuración del clima en la zona urbana, y al igual que para los macroclimas y el tiempo atmosférico, se deberá tener en cuenta el análisis de los elementos de configuración del clima, entre ellos la composición del aire, el espacio construido, así como el tráfico y los focos de calor generados por las unidades domésticas y la industria (Fernández García, 1996).

A través de la descripción del balance de energía, se puede entender el proceso de transformación y transferencia de la energía desde la superficie de la Tierra a la atmósfera urbana, en esta se explica cómo la energía absorbida por la superficie a través de la radiación y el calor producido por las actividades humanas tiene que emigrar a otro lugar, por lo que calienta el aire sobre la superficie.

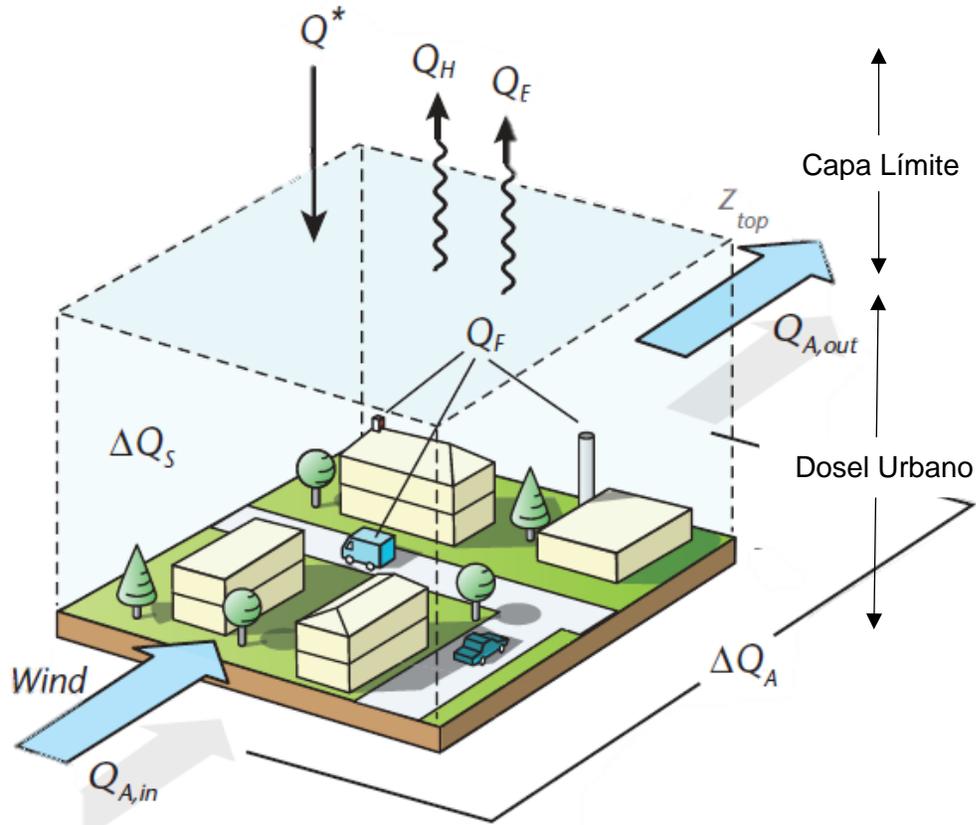


Imagen 2.4 Capas del sistema climático urbano.
Fuente: Oke, et. al., 2017, pág. 157.

El proceso de transferencia de energía, de acuerdo con Gartland (2008), tiene sus bases en la primera ley de la termodinámica, en donde se establece que la energía no se gana ni se pierde, solo se transforma; considerando cinco variables que rigen el comportamiento del balance de energía: convección, evaporación, almacenamiento de calor, el calor antropogénico y la radiación neta.

En primer lugar, la convección (Q_H) se describe como el proceso mediante el cual la energía es transferida de una superficie sólida a un fluido, que en este caso sería transferida de la superficie al viento que circula por encima, de tal manera que la

convección se incrementa bajo dos condiciones: la turbulencia del aire sobre la rugosidad de la superficie y cuando la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del aire son muy grandes. Por su parte, la evaporación (Q_E) es descrita como el proceso mediante el cual la energía de la superficie es transferida a la atmósfera en forma de vapor de agua proveniente del suelo o cuerpos de agua, enfatizando que el proceso se incrementa cuando la humedad aumenta y los vientos son secos, calurosos y su velocidad es alta (Gartland, 2008).

El almacenamiento de calor (ΔQ_s) es considerado por Gartland (2008), como la capacidad de un material para retener el calor y que esta depende de factores como la conductividad térmica y la capacidad calorífica del material en cuestión. El calor antropogénico (Q_F) es descrito como el calor que generan las actividades humanas y que proviene de fuentes como los edificios, maquinaria y la misma población, aclara que en las áreas urbanas esta variable es uno de los factores que tiene influencia en la formación de Islas de Calor. Finalmente, la radiación neta (Q^*) se considera a partir de cuatro procesos de radiación: la radiación que emite el Sol, la radiación solar reflectada por los materiales, la radiación atmosférica y la radiación proveniente de la superficie terrestre.

Oke, et. al. (2017), consideran las mismas variables que Gartland (2008) para el estudio del balance de energía de un sistema urbano, pero agrega la variable que denomina ΔQ_A , donde considera la energía que entra y sale del sistema a partir del flujo de aire y su transporte a través de las superficies tridimensionales constituidas por las construcciones, aclarando que en algunos estudios se evita el uso de esta variable y se considera que el viento dentro del sistema urbano permanece relativamente homogéneo. Además, realiza una distinción entre los elementos del balance de energía que ocurren en la subcapa de rugosidad (Z_{top} y Z_{bot}) dentro del dosel urbano.

2.3.3 Escalas urbanas

Con la finalidad de precisar los estudios de clima urbano, se realiza una clasificación de los componentes de un área urbana que son propensos a modificar el clima local

(Oke, 2006); entre los que se incluyen, incluye la rugosidad del terreno de acuerdo con la clasificación de Davenport, donde se describe la capacidad del viento para circular y dispersarse en un medio específico, que en este caso se trataría de una ciudad; la relación de aspecto, que relaciona el régimen de temperatura y el control térmico, en el que la cantidad y altura de la de vegetación (árboles) impactan de manera significativa; finalmente se expone como otro factor el porcentaje de la superficie que se encuentra cubierto por edificios.

También se realiza una clasificación horizontal de tres escalas urbanas de acuerdo con lo dicho por Oke (2006) en la clasificación de componentes, estas se presentan en el orden de microescala (también llamada escala de calle, donde se analizan las dimensiones de construcciones individuales, calles, arboles, jardines, etc.), escala local (escala de vecindario, incluye la topografía del lugar en las áreas con una configuración y desarrollo similar) y la mesoescala (escala de ciudad, en este caso se evalúan todos los aspectos que conforman a la ciudad, mediante la complementación de estudio de las escalas anteriores) (Van Hove, et al., 2011).

2.3.4 Metodologías para el análisis del clima urbano

De acuerdo con Oke, et.al., (2017), para que una metodología de análisis del clima urbano se considere apropiada, se deben establecer criterios científicos donde se detallan los procesos físicos como los parámetros de temperatura del aire, se debe delimitar una extensión geográfica para trabajar y finalmente, un sistema para evaluar las condiciones físicas de manera horizontal, vertical y temporal; por lo que algunas de las metodologías más aplicadas son las siguientes:

a) Observaciones de campo.

Este tipo de método requiere el uso de sensores apropiados para obtener las magnitudes de las diferentes variables, así como mantener un registro de estos datos, tal es el caso de los estudios realizados por Howard (1833) para la ciudad de Londres, a partir de datos obtenidos en observatorios.

La metodología puede ser simple o compleja, dependiendo de la cantidad de datos con los que se cuente y los propósitos del estudio. Existen diferentes

formas de obtener los datos necesarios para esta metodología, entre los que se encuentran, los sensores colocados en estaciones fijas, los registros en transectos (Jáuregui-Ostos, 1979), y datos obtenidos mediante globos adaptados que avanzan con la circulación del aire. Dentro de esta metodología se incluyen las técnicas de percepción remota, realizadas a partir de sensores colocados en satélites.

b) Modelos físicos.

Con esta metodología se requiere de crear un modelo a escala del área de estudio, este estudio permite realizar experimentos cuasi-controlados, pues el modelo a escala se somete a las condiciones climáticas que normalmente tendría la zona original (condiciones de circulación de viento, agua, etc., conocidos como forzadores), pero de manera controlada.

c) Modelos numéricos.

Este método utiliza ecuaciones que permiten simular las condiciones de los fenómenos climáticos que se desarrollan en el mundo real; usualmente se utilizan para entender los procesos de intercambio de energía, masa y movimiento. En general, se basa en la aplicación de la física teórica a las condiciones que presenta una zona de estudio determinada.

d) Modelos empíricos.

Finalmente, esta metodología hace uso de una relación estadística entre las diferentes variables que se consultan en trabajos basados en modelos más sofisticados (justificando la base empírica), y por lo general tienen como resultado la formulación de una ecuación de regresión que puede predecir el valor de la variable que se haya establecido como dependiente en función de la variable independiente.

2.4 Isla de Calor

Howard (1833), fue el primero en realizar estudios de la diferencia de calor que se producía en una zona urbana y una rural durante ciertos periodos de tiempo. Manley (1958), menciona por primera vez el concepto Isla de Calor para referirse al calor artificial que se había identificado en la ciudad de Londres y que era causado por

las edificaciones que ahí se encontraban y que ocasionaban patrones de caída de nieve diferentes entre una zona urbana y una rural (Manley, 1958). Por lo cual, se sabe que la Isla de Calor es el resultado de los cambios que genera la actividad humana en la superficie y no mantiene una condición constante, sino que tiene una variación diurna (Landsberg, 1981).

Una definición formal del término Isla de Calor es proporcionado por Oke (1982), quien lo describe como una anomalía térmica con dimensiones verticales, horizontales y temporales que ocurren dentro de las ciudades, y que se produce a causa de factores antropogénicos y naturales tales como su ubicación geográfica y el clima; además se encuentra rodeada por un área rural, característica a partir de la cual se le puede otorgar el nombre de Isla.

Por otra parte, Landsberg (1981), define a la Isla de Calor en función de isotermas, diciendo que cuanto más cerradas estas se encuentran entorno a un territorio urbano con respecto a uno rural, puede decirse que se produce el fenómeno Isla de Calor Urbano.

2.4.1 Causas de las Islas de Calor

De acuerdo con Gartland (2008), las Islas de Calor se forman en áreas urbanas debido a los materiales que conforman las construcciones, tienden a absorber y retener un porcentaje mayor de radiación solar que los materiales que pueden encontrarse en zonas rurales; en función de esto, menciona que hay dos principales causas para este fenómeno de calentamiento: la impermeabilidad de los materiales, que impide que el vapor se disipe con la radiación solar; y los materiales oscuros como el concreto que predominan estas áreas, debido a su albedo.

En palabras de Chang (2016), el fenómeno de la Isla de Calor ocurre cuando el almacenamiento de la radiación solar en las zonas urbanas se produce durante el día y por las noches este calor es liberado a la atmósfera, pues el proceso de urbanización altera el balance de energía natural de la superficie. Por su parte, Oke (1982), menciona que la Isla de Calor está condicionada a factores tales como la

localización de la ciudad, la presencia de cuerpos de agua, elementos topográficos, así como los tipos y usos de suelo, además de la presencia de vegetación en una región determinada; describe que la relación entre el tamaño de la ciudad y la intensidad con la que se presenta la Isla de Calor es directamente proporcional, y que no debe confundirse el tamaño de la ciudad con la población que habita en ella, sino con el área geográfica que ocupa.

Además, se mencionan diferentes factores que se han estudiado como causas del fenómeno de las Islas de Calor, entre los que se mencionan los siguientes: el incremento de la absorción de radiación de onda corta a causa de la geometría de cañón que se produce entre los edificios y el incremento de las superficies con diferentes albedos, la pérdida de radiación de onda larga ocasionada por la contaminación del aire, el almacenamiento de calor antropogénico ocasionado por los materiales de construcción, la disminución de la evaporación ocasionado por la geometría de los edificios y la configuración de cañones que impiden la circulación normal del viento, al que también se asocia la disminución de la disipación del calor (Oke, 1982).

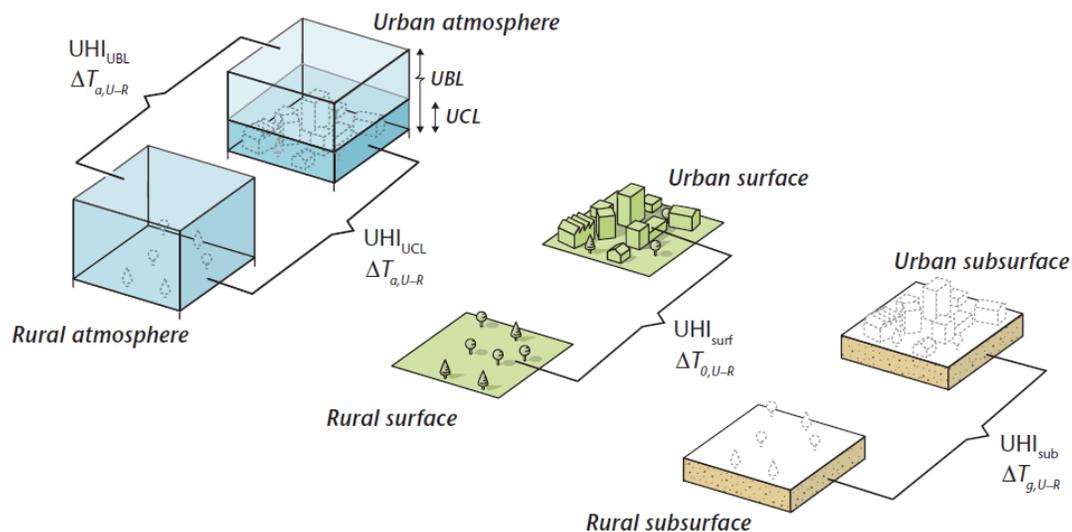
2.4.2 Tipos de Islas de Calor

Se definen cuatro tipos de Isla de Calor, de acuerdo con la clasificación de Oke, et. al. (2017), esta clasificación se realiza en función del lugar en el sistema urbano en que se realizan las mediciones de temperatura:

- a) Isla de Calor subsuperficial (UHI_{SUB}): se evalúan las diferencias en los patrones de temperatura que muestra el suelo debajo de las ciudades y las construcciones subterráneas en contraste con el subsuelo en las zonas rurales; este tipo de Islas de Calor usualmente se evalúan mediante sensores de temperatura para suelos.
- b) Isla de Calor de superficie (UHI_{SURF}): en este caso se evalúan las diferencias de la temperatura en la atmósfera inmediata a las construcciones, para valorar la influencia de los materiales de construcción en la retención de calor y el incremento de temperatura, comparándolo con la temperatura de la

superficie que se percibe en las zonas rurales; usualmente se mide a partir de sensores de temperatura colocados en la superficie o mediante sensores instalados en satelitales o aviones especializados.

- c) Isla de Calor de dosel (UHI_{UCL}): se realiza un estudio de las diferencias de temperatura entre la temperatura del aire que se encuentra dentro de la capa de dosel urbano, es decir, entre la superficie y el nivel del techo de las construcciones, para su comparación con las zonas rurales, se mide la temperatura en alturas similares a las que se presentaron dentro de la zona urbana; usualmente se utilizan sensores de temperatura colocados en puntos estratégicos y unidades móviles o mediante técnicas de percepción remota como lo son el LIDAR y el SODAR.
- d) Isla de Calor de capa límite (UHI_{UBL}): se establecen las diferencias de temperatura que se producen en el aire que se encuentra entre el techo de los edificios y la atmósfera inmediata, en una escala similar a la comprendida por la capa de dosel, y se realizan las mismas mediciones de temperatura para la zona rural que rodea a la urbanización; en este caso, se emplean las mismas técnicas de medición que en el caso de la Isla de Calor de dosel.



*Imagen 2.5 Tipos de Islas de calor.
Fuente: Oke, et. al., 2017, pág. 199.*

2.4.3 Medición

Gartland (2008), describe que la mejor forma de medir el fenómeno de las Islas de Calor es analizar los patrones del clima regional con y sin la ciudad, por lo que se recurre a métodos que ayudan a determinar la influencia de las construcciones en el clima urbano; por lo que se hace uso de los siguientes métodos:

- e) Estaciones fijas: constituyen el método más empleado para medir las Islas de Calor, y a partir de los datos que proporcionan, se comparan los datos históricos de los elementos del clima entre dos o más estaciones. Usualmente se compara la información entre una estación ubicada en una zona rural y una urbana, pero también se pueden realizar estudios con más estaciones para obtener los impactos bidimensionales del lugar, además, el fenómeno puede analizarse también desde un punto de vista de desarrollo a lo largo del tiempo, para ayudar a determinar las tendencias de crecimiento del fenómeno.
- f) Transectos móviles: para realizar mediciones mediante este método, es necesario realizar recorridos por rutas previamente determinadas con instrumentos de medición para las variables climáticas, entre ellas la temperatura, y se debe considerar que este método presenta algunos inconvenientes, dado que la tecnología utilizada se debe mantener alejada de fuentes de calor continuas, para que los datos que se obtengan cuenten con un grado de validez; además de que el tiempo en que se tarda en realizar el recorrido es un punto a considerar, dado que en ese tiempo las condiciones ambientales pudieron cambiar.
- g) Percepción remota: esta técnica se utiliza para medir la Isla de Calor de superficie, pues se basa en la información que arrojan sensores especializados a partir de la energía que es reflejada y emitida de la superficie hacia la atmósfera; estos sensores usualmente se colocan en satélites o en aviones.
- h) Percepción vertical: Esta técnica se usa para medir las diferencias de temperatura entre las capas de dosel de las zonas urbanas y rurales, se

realiza a partir de la medición de temperaturas en diferentes alturas por encima de la superficie de la tierra, las mediciones usualmente se realizan con globos aerostáticos o torres en las que se instalan sensores a diferentes altitudes.

- i) Balances de energía: este método brinda información que ayuda a entender el origen de la Isla de Calor, debido a que se analizan las entradas y salidas de energía de la superficie a la atmósfera y viceversa.

De acuerdo con Arnfield (2003), generalmente para el modelado del fenómeno de las Islas de Calor, se han utilizado tres tipos de modelos: modelos físicos a escala, modelos numéricos y de percepción remota.

2.4.4 Intensidad de la Isla de Calor

La intensidad de las Islas de Calor es definida como la diferencia de temperatura entre las zonas rurales y urbanas (Martin-Vide, et al., 2015), en palabras de Van Hove, et. al. (2011), la intensidad de las Islas de Calor es producto de factores producidos tanto en una escala espacial como temporal; describe que el tamaño de la ciudad, el diseño urbano y su estructura, además de factores como el calor de origen antropogénico y la contaminación influyen a la intensidad con la que se presentan las Islas de calor en las escalas meso y micro climáticas.

Fernández García (1996), menciona que la intensidad de las Islas de calor es un indicador de la magnitud con la que se presenta el fenómeno, que depende del tamaño de la ciudad y las condiciones meteorológicas que lo predominan; además, clasifica las intensidades en cuatro tipos: débiles (ΔT se encuentra entre 0 y 2 °C), moderadas (ΔT se encuentra entre 2 y 4 °C), fuertes (ΔT se encuentra entre 4 y 6 °C) y muy fuertes (ΔT es mayor a 6 °C).

De acuerdo con Gartland (2008), la intensidad de las Islas de calor varía entre el día y la noche, y suele presentarse con mayor intensidad durante la noche, debido a que las superficies del entorno urbano comienzan a liberar calor durante este periodo de tiempo.

2.4.5 Consecuencias de las Islas de Calor

Landsberg (1981), Gartland (2008), la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2008) y Contreras Cardosa (2008), sugieren un conjunto de efectos generados por el fenómeno de las Islas de calor, entre los que se encuentran los siguientes:

- a) Incremento en el consumo de energía: en ciudades donde las temperaturas tienden a bajar en extremo o en las épocas invernales, las Islas de Calor benefician en el consumo de energía, pues proporcionan un sistema de calefacción; por el contrario, durante el verano o en ciudades donde las temperaturas suelen ser elevadas por naturaleza, la demanda de energía para sistemas de refrigeración aumenta (Landsberg, 1981; EPA, 2008).
- b) Aumento de contaminantes del aire y gases de efecto invernadero: como consecuencia directa del consumo de energía, la EPA (2008), menciona que esta demanda de energía ocasiona que los niveles de contaminantes aumenten debido a la quema de combustibles fósiles, entre los que se incluyen el dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado (PM), monóxido de carbono (CO), mercurio (Hg) y dióxido de carbono (CO_2), que son dañinos a la salud humana y contribuyen al cambio climático.

Además, Contreras Cardosa, et. al. (2008), menciona que el CO_2 y los NO_x al ser precursores del ozono (O_3), aceleran la formación de este a nivel troposférico y contribuyen a la formación del smog. Gartland (2008) explica este proceso de formación y acumulación de contaminantes mediante la inversión térmica, describe que en condiciones normales, la temperatura varía dependiendo la altitud en la que se analiza y la humedad del aire, por lo que entre más altura, la temperatura desciende, y el proceso de inversión térmica ocurre cuando la temperatura en lugar de descender con la altura, aumenta, por lo cual los contaminantes se quedan atrapados cerca de la superficie terrestre, ocasionando daños al ambiente y a la salud.

- c) Daños a la salud humana: debido a las elevadas temperaturas y la contaminación, las Islas de Calor influyen en el confort térmico de la población, tienen un impacto en los problemas respiratorios, insolación y casos de mortalidad asociados a las elevadas temperaturas (EPA, 2008).
- d) Calidad del agua: la EPA (2008), menciona que las Islas de Calor contribuyen a la disminución de la calidad del agua debido a la contaminación térmica a la que se ven sometidos los cuerpos de agua que se encuentran dentro de las ciudades y en su periferia, lo cual tiene un impacto negativo en los ecosistemas acuáticos.

2.5 Sistemas de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG), puede definirse como un sistema computarizado para la captura, almacenamiento, consulta, análisis y visualización de datos con referencia geoespacial, es decir, que posean coordenadas vinculadas a un lugar en el espacio geográfico; y además de la información geoespacial, está compuesto por elementos como el hardware, como las computadoras y unidades de almacenamiento, software, que puede ser de acceso libre o bajo licencia, recursos humanos que definirán el propósito del SIG y una organización que proporciona una estructura de funcionamiento que vincula a todos los componentes (Chang, 2019).

Los SIG constituyen una forma de representar de manera simplificada entidades físicas reales, transformándolas en objetos cartográficos; por lo que un modelo espacial de datos puede ser definido como los objetos o entidades individuales en una base de datos espaciales y las relaciones que existen entre ellos, cuyo propósito es poder representar información georreferenciada y manipularla (Bolstad, 2016).

Los datos espaciales se representan en un SIG mediante dos tipos de modelos espaciales denominados datos vectoriales y datos ráster; en el primero la información se presenta en un formato de puntos y líneas que poseen un sistema de coordenadas y que en conjunto representan un elemento único dentro de un

sistema; por otra parte, los datos ráster se representan por medio de píxeles y cada uno es una unidad homogénea de información espacial, estructurada en conjuntos de filas y columnas (Gómez Delgado & Barredo Cano, 2005).

2.5.1 Software de los Sistemas de Información Geográfica

Bolstad (2016) enlista y describe algunos de los softwares disponibles para trabajar información georreferenciada, entre los que se encuentran los siguientes:

- a) ArcGIS: es un programa desarrollado por ESRI (Environmental Systems Research Institute) con una licencia comercial, en el que se pueden desarrollar procesos complejos a partir de información georreferenciada preexistente; es uno de los softwares más conocidos dentro de los SIG. Cuenta con una amplia gama de herramientas para realizar diferentes procesos a las capas de información y soporta diferentes formatos de esta.
- b) QGIS: al contrario que ArcGIS, este software es de uso libre fue desarrollado por la Open Source Geospatial Foundation y provee herramientas básicas para el procesamiento de información cartográfica, constantemente se actualiza y se desarrollan diferentes herramientas que pueden ser utilizadas para la manipulación de la información en su interfaz.
- c) Idrisi: es un software que desarrolló la Universidad Clark en Massachusetts, está orientado al procesamiento de información en formato ráster principalmente, está pensado para la enseñanza y como una herramienta de investigación.

Además de los mencionados, existe una amplia gama de programas que se utilizan para el procesamiento de información con referencia espacial, tal es el caso del software que la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) pone a disposición del público de manera gratuita y que tiene la finalidad de proporcionar una herramienta propia para el tratamiento de las imágenes satelitales que proveen. Sentinel Application Platform (SNAP) es el nombre que asignan a la interfaz que desarrollan Brockmann Consult, SkyWatch y C-S y al que denominan como una “caja de herramientas” para la portabilidad, procesamiento de datos y

almacenamiento de información procedente de las misiones Sentinel que desarrolla dicha agencia (ESA, 2020).

2.5.1 Percepción remota en los Sistemas de Información Geográfica

En palabras de Fernández García (1996), la percepción remota puede ser entendida como la técnica de obtención de información sin mantener un contacto directo con el objeto a analizar, aclara que, para el caso de los estudios del clima, este medio de obtención de información es la radiación electromagnética.

Para estudios ambientales, la percepción remota se utiliza para determinar el estado de una o más variables de origen físico, biológico o geográfico; esto se realiza a partir de ondas electromagnéticas que transmiten información de un objeto determinado a un sensor de percepción remota que recibe la información y determina las propiedades electromagnéticas del objeto, para este caso, una imagen a color es una proyección de una escena tridimensional de la superficie y contiene además, información adicional de esta que se obtiene a partir de las propiedades de refracción en la superficie (Schanda, 1986).

2.5.2 Sensores utilizados para la adquisición de información geoespacial

Oke, et. al. (2017) realizan una recopilación de los sensores que se utilizan para la recolección de información y aclaran que cada uno tiene un propósito específico: el radiómetro realiza mediciones de los flujos de radiación que emite la superficie, es decir, mide la radiación solar o infrarroja); el radar funciona a partir de ondas de radio y se utiliza para medir el movimiento de materiales suspendidos en la atmósfera, como flujos de aire, aerosoles, nubes y precipitación; el sodar y el perfilador de viento se utilizan para medir el viento dentro de la atmósfera urbana, el primero funciona a partir de ondas de sonido, mientras que el segundo utiliza microondas, a partir de ellos se obtienen mediciones que pueden caracterizar el perfil vertical del viento y las turbulencias en la atmósfera urbana y la troposfera.

A partir de microondas y ondas de sonido funciona el sistema RASS (Radio Acoustic Sounding System), que de manera simultánea mide la temperatura del aire y realiza perfiles de viento en la atmósfera que alcanzan una altitud de hasta 1.5 kilómetros; por otra parte, el Lidar se coloca en la superficie y por medio de un láser monocromático detecta aerosoles y gotas de nubes, se utiliza para determinar las inversiones térmicas por medio del monitoreo de los aerosoles, este sensor puede utilizarse también en los satélites, aviones especializados o globos para realizar modelos de superficie digitales (Oke, et al., 2017).

2.6. Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales son el resultado que generan las técnicas de percepción remota a partir de los diferentes sensores colocados en satélites que usualmente se utilizan para monitorear los diferentes procesos terrestres; los sensores que se colocan en los satélites proporcionan información instantánea del área que recorren (Bolstad, 2016).

Las imágenes satelitales o información ráster usualmente contienen diferentes bandas de información, pueden ser pancromáticas o multiespectrales, lo que significa que las imágenes pancromáticas poseen una sola banda de información que puede ser visualizada en escala de grises, mientras que las multiespectrales tienen diferentes bandas de información y pueden ser visualizadas en composiciones de color; cada una de estas bandas es un conjunto de celdas que posee información sobre un aspecto determinado y están determinadas por la longitud de onda que emite un cuerpo y que usualmente se clasifican en las siguientes: luz visible (0.4 – 0.7 μm), infrarrojo cercano (0.75 – 1.4 μm) e infrarrojo de onda corta (1.4 – 3 μm) (Chang, 2019)

2.6.1. Procesamiento de imágenes satelitales

De acuerdo con Rees (2012), el procesamiento de imágenes satelitales consiste en un proceso de tres pasos generales:

- d) Preprocesamiento: en este paso se calibra y remueven los errores que existan en los datos, es decir, se utiliza la corrección radiométrica o geométrica para que los valores de las celdas en la imagen sean homogéneos, la corrección radiométrica se basa en la corrección de errores basado en los parámetros estadísticos que corresponden a la reflectancia, altitud y parámetros de control propios del sensor, mientras que la corrección geográfica se basa en el sistema de coordenadas, pues se busca asegurar que la imagen se encuentre situada en el sistema de coordenadas que le corresponde para que todas las bandas que conforman la imagen se superpongan sobre el lugar donde fue capturada la imagen.
- e) Mejora de la imagen: se realiza mediante una modificación de contraste o la modificación de las bandas, que consiste en generar nuevas capas de información ráster mediante combinaciones matemáticas de las bandas disponibles.
- f) Clasificación: en este paso se agrupan los valores que poseen los píxeles de la capa ráster en un sistema de clases para poder representar los diferentes objetos o características físicas que muestran las imágenes.

2.6.2. Landsat

Chang (2019), describe que el programa Landsat de los Estados Unidos de América es administrado por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) y el Servicio Geológico del país (USGS) desde 1972; las misiones Landsat 1, 2 y 3 proveen imágenes multiespectrales con una resolución de 79 metros, mientras que las misiones 4, 5, 6, 7 y 8 obtienen información en una resolución de 30 metros y cada una de las misiones se caracteriza por incluir un tipo de sensor que brinda información característica, como es el caso de la misión 8 lanzada en 2013, que incluye un sensor infrarrojo térmico que arroja información térmica en dos bandas espectrales.

2.6.3. SPOT

Los satélites de origen francés SPOT tienen sus inicios en el año de 1986 y las misiones 1 a la 4, contienen dos tipos de sensores que permiten obtener imágenes pancromáticas con una resolución de 10 metros y multiespectrales con una resolución de 20 metros (Chang, 2019), mientras que las misiones 5 a 7, son utilizadas para crear entre otras cosas, modelos de elevación de la superficie con resoluciones de entre 1.5 metros para las imágenes pancromáticas y de 6 metros para las multiespectrales (Bolstad, 2016).

2.6.4. Sentinel

El programa Sentinel es un conjunto de misiones gestionadas y administradas por la Agencia Espacial Europea (ESA), su primera misión fue lanzada en el año 2014 bajo la iniciativa Copernicus y proporciona imágenes con una resolución de 20 metros, este satélite opera de manera diurna con una banda que le permite realizar mediciones de las condiciones en la superficie terrestre independientemente del clima; la misión Sentinel-2 proporciona información distribuida en 13 bandas que se encuentran entre el espectro de luz visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta y su información es arrojada con una resolución de 10 metros para 4 bandas, 20 metros para seis bandas y las 3 restantes con una resolución de 30 metros (Chang, 2019).

La misión Sentinel-3, tiene como objetivos principales el medir la topografía de la superficie, la temperatura del mar y la superficie terrestre, es decir, sus propósitos son monitorear el ambiente y el clima, cuentan con una resolución de 500 metros para las bandas de refracción solar y de 1 kilómetro para las bandas térmicas infrarrojas; por su parte, las misiones Sentinel 4 y 5 tienen un enfoque orientado hacia el análisis de contaminantes en la atmósfera, calidad del aire y la interacción que estos elementos tienen con el clima, estas misiones proporcionan información sobre contaminantes entre los que se encuentran el ozono (O_3), ozono troposférico, dióxido de nitrógeno (NO_2), el dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO),

metano (CH₄), aerosoles entre otros y cada misión tiene un ciclo de orbita de entre 27 y 29 días (ESA, 2020).

2.7. Normatividad aplicable a las Islas de Calor

2.7.1. Normatividad internacional aplicable a Islas de Calor

El gobierno de Estados Unidos de Norteamérica tiene a disposición del público un compendio de estrategias para la mitigación de las Islas de calor, dicho trabajo se compone de 6 capítulos, entre los que se plantea la definición del fenómeno, así como sus causas y consecuencias, además de algunas estrategias en los capítulos posteriores, pero es en el capítulo 6 donde se mencionan las medidas políticas que se han tomado para la reducción del fenómeno (EPA, 2008). En este apartado, la EPA (2008), menciona que algunos de los estados que conforman el territorio de este país, han incorporado algunas estrategias de mitigación de las Islas de calor dentro de sus políticas y regulaciones, que incluyen estrategias como la incorporación de tecnología para la mitigación para los edificios de gobierno; se desarrollan proyectos a partir de la resolución de iniciativas que proveen un primer acercamiento a proyectos con mayor alcance dentro de la mitigación de las ICU; en algunos gobiernos locales se han instaurado políticas de ordenamiento para el paisaje y el arbolado, con la finalidad de proteger los mismos y proveer de sombra en los espacios públicos. También se han incorporado planes y guías que tienen un objetivo a largo plazo y mediante los cuales se establecen códigos de zonificación y regulación enfocados principalmente en establecer metas y objetivos para el desarrollo de áreas específicas de acuerdo con los edificios, densidad de población y requerimientos en estacionamientos; además cuentan con programas y estándares de construcción verde, finalmente, el gobierno de este país cuenta con requerimientos para la calidad del aire, que se enfocan en el desarrollo de estrategias de control de emisiones por parte de algunas fuentes de contaminación (EPA, 2008).

Por otra parte, en Colombia existe una guía de lineamientos para el ámbito urbano, que se desprende del Plan de Acción de la Política Pública de Ecourbanismo y

Construcción Sostenible, y mediante la cual se busca desarrollar las estrategias, lineamientos y prácticas que fomenten el desempeño ambiental en proyectos urbanos; la guía se divide en 6 ejes temáticos dentro de los cuales, en el eje temático de materiales y residuos se identifica el objetivo 3, donde plantean la reducción de los efectos de la Isla de Calor y cuyas estrategias se enfocan en fomentar el uso de materiales que generen un impacto ambiental bajo en las superficies de las zonas urbanas, además de propiciar la filtración de la escorrentía mediante la construcción de espacios permeables en las urbanizaciones (SDP y UNC, 2015). La reducción del efecto de las Islas de calor también se aborda como objetivo en el eje temático correspondiente a infraestructuras verdes y servicios ecosistémicos, para este caso, la Secretaría de Planeación Distrital de Bogotá y la Universidad Nacional de Colombia (2015), mencionan la propuesta de conformar y preservar hábitats naturales que se sumen a los que existen en la actualidad, con la finalidad de generar espacios de filtración; el eje temático relacionado con aire incorpora la temática de las Islas de calor a partir de la reducción de áreas *duras*, es decir, cementadas, para mitigar los efectos de la Isla de Calor en la contaminación.

2.7.2. Normatividad nacional aplicable a Islas de Calor

Para el caso de México, la NMX-AA-164-SCFI-2013 establece los criterios y requerimientos ambientales mínimos para la edificación sustentable, cabe resaltar que se trata de una norma de aplicación voluntaria para las edificaciones que se ubican dentro del territorio nacional independientemente del uso que ésta tenga. Dentro de los requisitos particulares para el suelo, se menciona que el porcentaje de áreas libres debe ser mayor al valor mínimo (10%) y deben cumplir con al menos dos de las tres especificaciones entre las que se encuentran: el ser de uso común para usuarios/visitantes, que permitan la infiltración de agua y/o destinar el 30% para áreas verdes, y en el caso de proyectos de remodelación, se deben contemplar las azoteas verdes.

Además, menciona que se puede cubrir el 100% del área del techo con materiales con un Índice de Refracción Solar (IRS) superior a 78 o bien tener una azotea

naturada en el 50% de la superficie del techo, adicional a esto, menciona que si en la fachada del edificio se cuenta con más de 20m² o más del 30% cubierta por materiales que produzcan una reflexión total se debe probar que esto no afectará, entre otras cosas, al incremento de la carga térmica de las edificaciones adyacentes o la vía pública. Se menciona que las áreas libres pavimentadas y estacionamientos deben contemplar que al menos el 50% de su diseño incluya acciones para la disminución del fenómeno de las ICU (Secretaría de Economía, 2013).

Por otra parte, en el año 2015 surge la propuesta de modificar ordenamientos ambientales tales como la LGEEPA (Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente), la Ley General de Asentamientos Humanos y la Ley General de Cambio Climático, con la finalidad de integrar el concepto de Isla de Calor a la normatividad vigente, esta propuesta tuvo como objetivo el propiciar una mejora en la salud pública y las condiciones de vida de la población, dado que se planteaba incorporar estrategias para la mitigación de los efectos del fenómeno (Cámara de Diputados, 2015), sin embargo, no se muestra un seguimiento o la aceptación de esta propuesta por parte del órgano de gobierno responsable.

También como propuesta, se cuenta con el Proyecto de la Norma Mexicana PROY-NMX-C-7730-ONNCCE-2017 en la que se aborda el confort térmico desde la perspectiva de la construcción, mediante el cálculo de índices VME (Voto Medio Estimado) y PEI (Porcentaje Estimado de Insatisfechos), que tiene su base en la ISO 7730, que establece criterios de confort térmico (SEGOB, 2018).

Capítulo 3

Marco

contextual

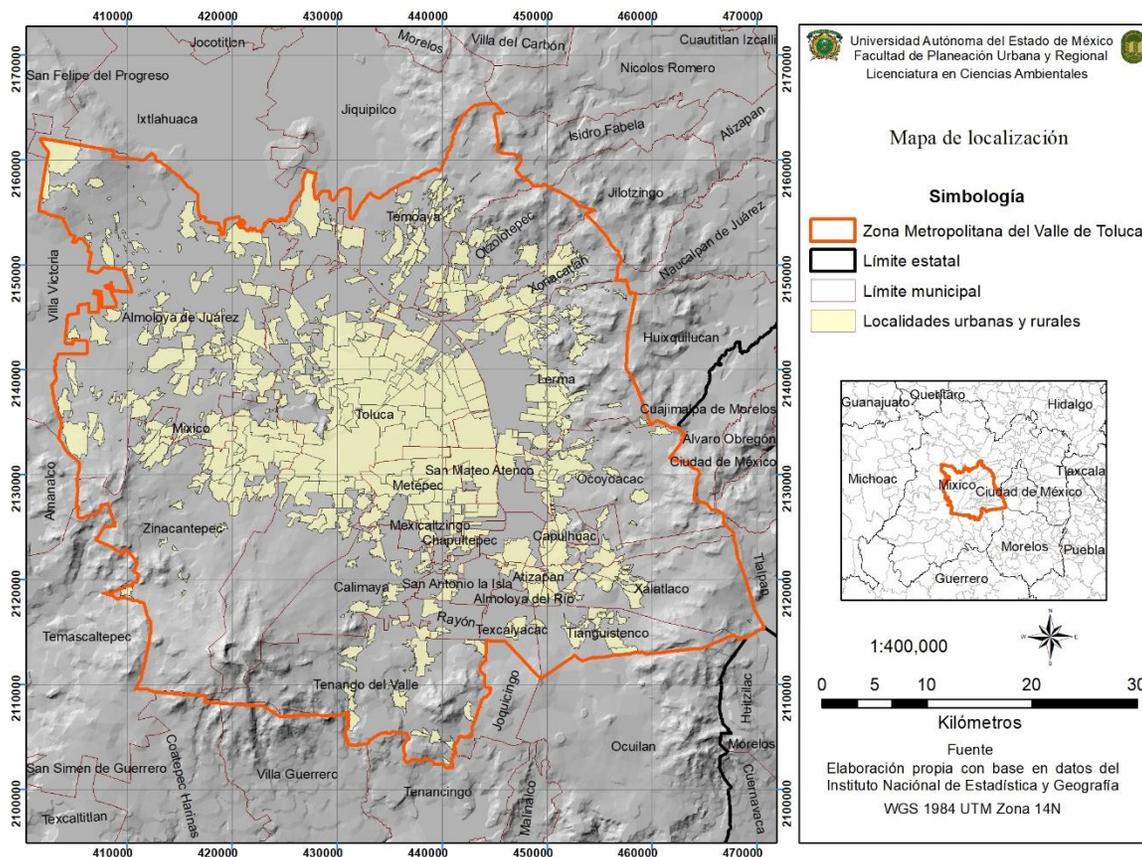


Capítulo 3. Marco contextual

En el presente capítulo se describen las características de la zona de estudio, con la finalidad de contextualizar los procesos naturales y antropogénicos de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y que son considerados como factores de presión para la generación del fenómeno de las Islas de calor.

3.1 Zona Metropolitana del Valle de Toluca

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca o ZMVT (Mapa 3.1) se encuentra integrada por 22 municipios del Estado de México listados en la Tabla 3.1 (IGECEM, 2017), y es considerada como la quinta metrópoli más grande, pues alberga una población mayor a 2 millones de habitantes y tiene una de las concentraciones urbanas más grandes del Estado (Centro Mario Molina, 2014).



Mapa 3.1 Localización geográfica de la ZMVT.
Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2017).

Municipio	Población 2020
Almoloya de Juárez	174,587
Almoloya del Río	12,694
Atizapán	12,984
Capulhuac	36,921
Chapultepec	12,772
Lerma	170,327
Metepec	242,307
Mexicaltzingo	13,807
Ocoyoacac	72,103
Otzolotepec	88,783
Rayón	15,972
San Antonio la Isla	31,962
San Mateo Atenco	97,418
Temoaya	105,766
Tenango del Valle	90,518
Texcaliacac	5,736
Tianguistenco	84,259
Toluca	910,608
Xalatlaco	30,687
Xonacatlán	54,633
Zinacantepec	203,872

*Tabla 3.1 Municipios que integran la ZMVT.
Fuente: elaboración propia a partir de INEGI (2020).*

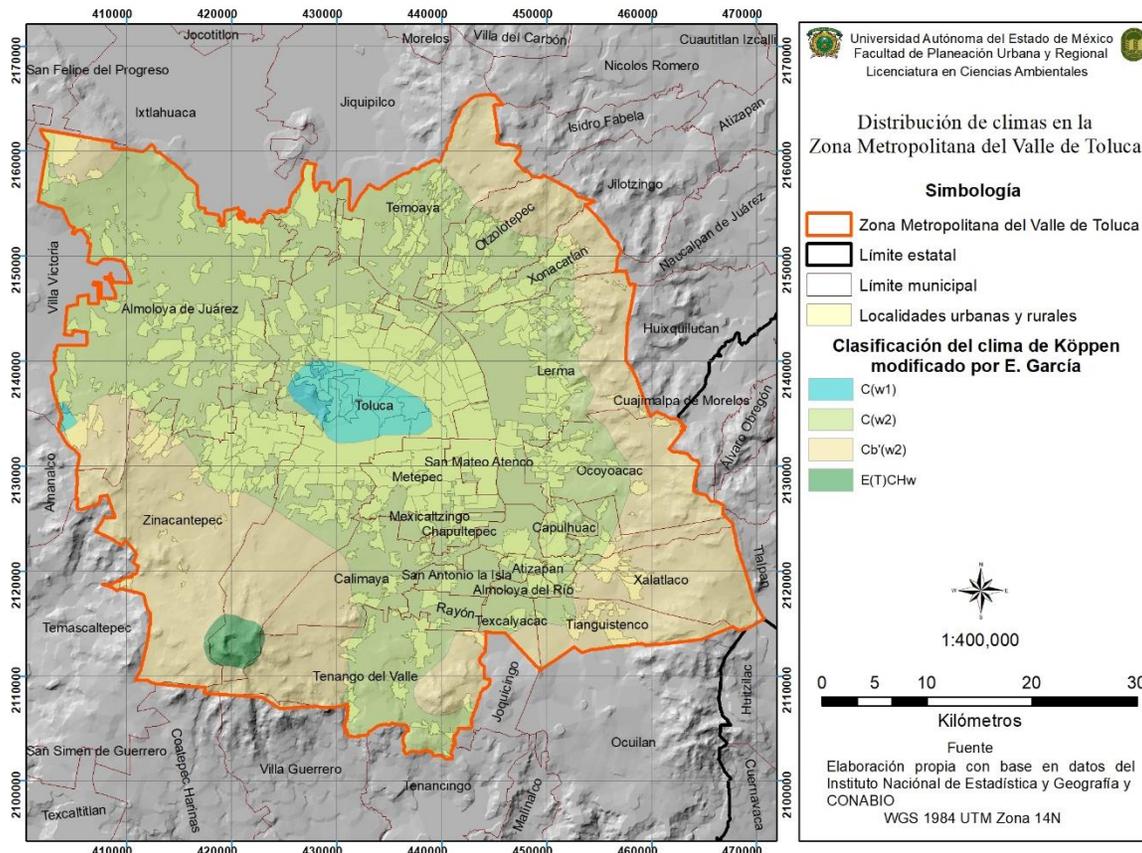
La ZMVT ocupa aproximadamente 2703.9 kilómetros cuadrados del Estado de México, de los cuales poco más del 30% se encuentra ocupado por un uso de suelo constituido esencialmente por edificios y construcciones que albergan a la población y las diferentes actividades económicas que se realizan en la región; esta superficie se encuentra localizada principalmente en la zona centro de la ZMVT, específicamente en los municipios de Toluca, San Mateo Atenco, Metepec y Zinacantepec. (INEGI, 2017).

3.2 Descripción del ecosistema urbano

Tomando en cuenta que un ecosistema urbano se compone de características bióticas y abióticas (Oke, et al., 2017), a continuación, se describen las características de la ZMVT que influyen en la generación del fenómeno de las Islas de calor.

3.2.1 Clima de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

Las condiciones atmosféricas de la ZMVT se ven influenciadas principalmente por el clima de la región, que de acuerdo con la clasificación de Köppen modificado por E. García (Mapa 3.2), corresponden a los siguientes:



Mapa 3.2 Climas que se presentan en la ZMVT.

Fuente: elaboración propia a partir de INEGI (2017) y CONABIO (1998).

- a) C(w1). Corresponde a un tipo de clima templado subhúmedo con una temperatura media anual de entre 12 y 18 °C, que durante el mes más frío se encuentra entre el rango de -3 y 18 °C y durante el mes más caluroso la temperatura se encuentra por debajo de los 22 °C, además de que la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm y se presentan lluvias de verano con índice de precipitación / temperatura entre 43.2 y 55, además el porcentaje de lluvia invernal corresponde a un rango de 5% y 10.2% del total anual (García, 2004). Este tipo de clima se presenta principalmente en

la zona norte del municipio de Toluca, en el centro de la ZMVT y en la zona suroeste del municipio de Almoloya de Juárez.

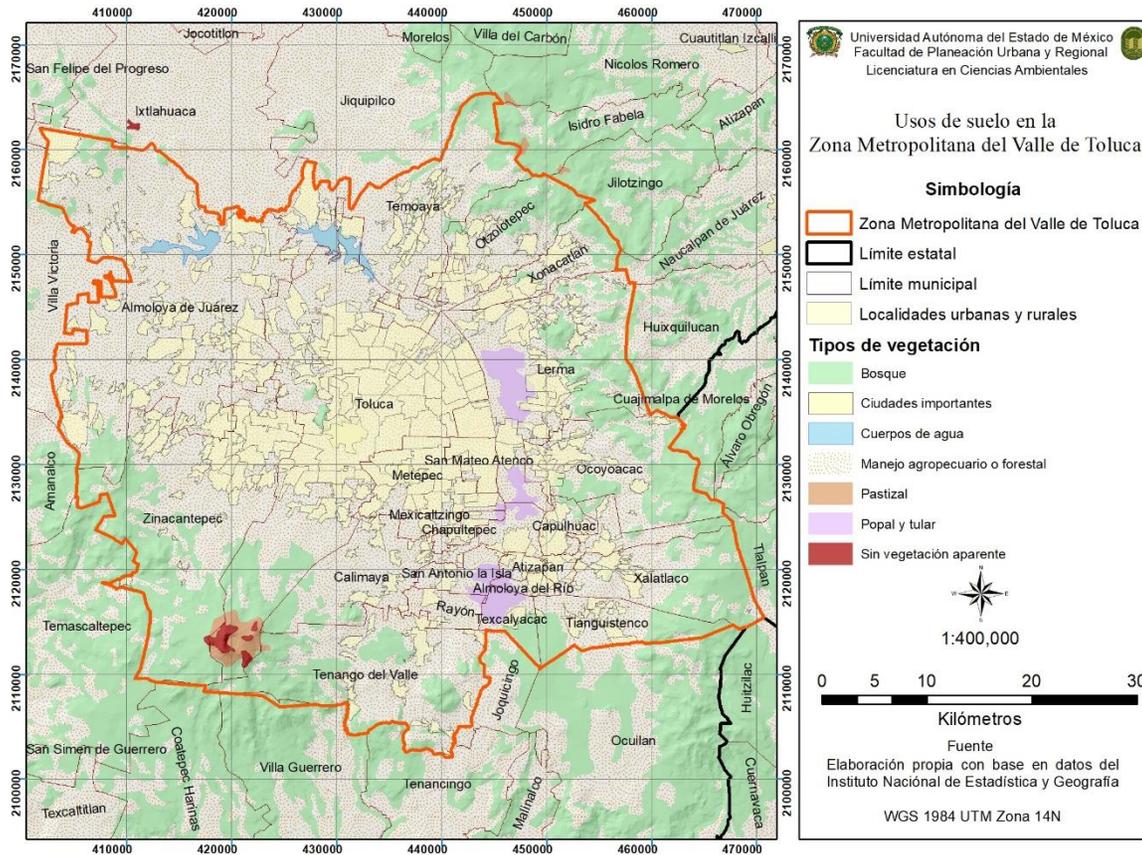
- b) C(w2). Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12 y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22 °C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice de precipitación / temperatura mayor de 55 y un porcentaje de lluvia invernal de entre 5 y 10.2% del total anual (García, 2004). Este tipo de clima predomina en los municipios que conforman la zona centro de la ZMVT, además es el clima que se presenta en una mayor extensión del territorio.
- c) Cb'(w2). Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5 y 12 °C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18 °C, temperatura del mes más caliente bajo 22 °C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual (García, 2004). Este tipo de clima es uno de los predominantes en la región y se presenta principalmente en los bordes este y oeste de la ZMVT.
- d) E(T)CHw. Frío, temperatura media anual entre -2 y 5 °C, temperatura del mes más frío sobre -3 °C y temperatura del mes más caliente entre 0 y 6.5 °C; se presentan lluvias durante el verano (García, 2004). Este clima se presenta únicamente en la zona núcleo del Área Natural Protegida Volcán Xinantecátl o Nevado de Toluca.

De acuerdo con Morales Méndez, et. al. (2007), por su localización geográfica y la convergencia de climas de tipo tropical, templado y frío, se genera una dinámica atmosférica que presenta variaciones a lo largo del año.

3.2.2 Vegetación de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

Dentro de la ZMVT se presentan diferentes usos de suelo (Mapa 3.3), de los cuales, un porcentaje importante se encuentra destinado a las superficies boscosas (aproximadamente 541 kilómetros cuadrados, es decir 20% de la ZMVT), los tipos de bosque que se encuentran dentro del área de estudio corresponden a bosques

de pino, encino y algunos otros tipos de coníferas. Sin embargo, la mayor parte del territorio se utiliza bajo un manejo de tipo agrícola, pecuario o plantaciones forestales (aproximadamente 1,261 kilómetros cuadrados, lo que representa el 46.6% del territorio), mientras que el porcentaje restante se encuentra conformado por zonas urbanas, pastizales naturales, zonas de popal y tulares y algunas áreas desprovistas de vegetación (INEGI, 2017)

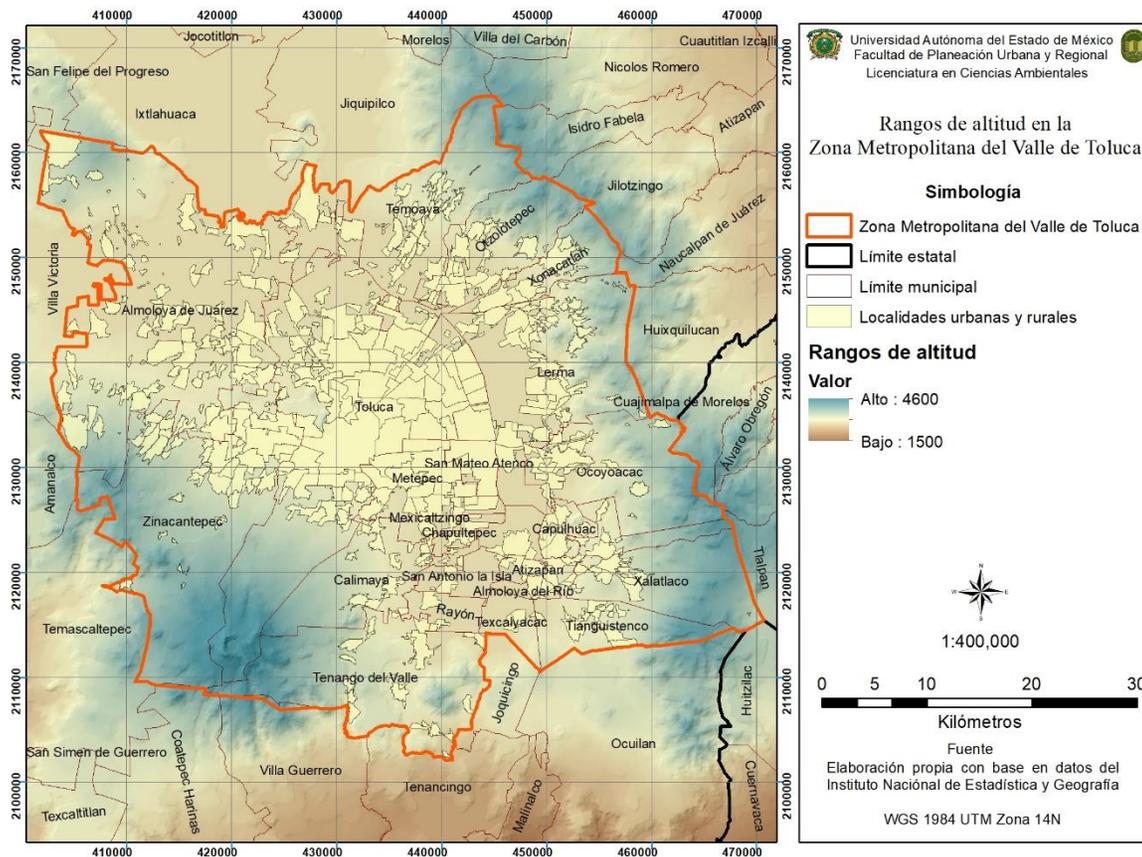


Es importante resaltar que dentro de los municipios que conforman a la ZMVT se encuentran algunas Áreas Naturales Protegidas (ANP) como lo son el Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) Nevado de Toluca, el APFF Ciénegas del Lerma, el Parque Estatal Sierra Morelos, además de algunos santuarios de agua y parques estatales que forman una parte importante en la dinámica del ecosistema

urbano, pues los servicios ambientales que prestan a la región influyen a las condiciones atmosféricas que se presentan en la zona (CEPANAF, s.f.).

3.2.3 Relieve de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

La ZMVT se encuentra localizada entre los 2,350 y 4,600 metros sobre el nivel del mar, y como puede visualizarse en el Mapa 3.4, las elevaciones más importantes se encuentran en los márgenes del territorio que comprende la zona de estudio, en el lugar se identifica la presencia de una sierra conformada por estratovolcanes al este de la ZMVT, al suroeste se encuentra el estrato volcán conocido como APFF Nevado de Toluca y al noroeste se encuentra un escudo de volcanes (INEGI, 2017).

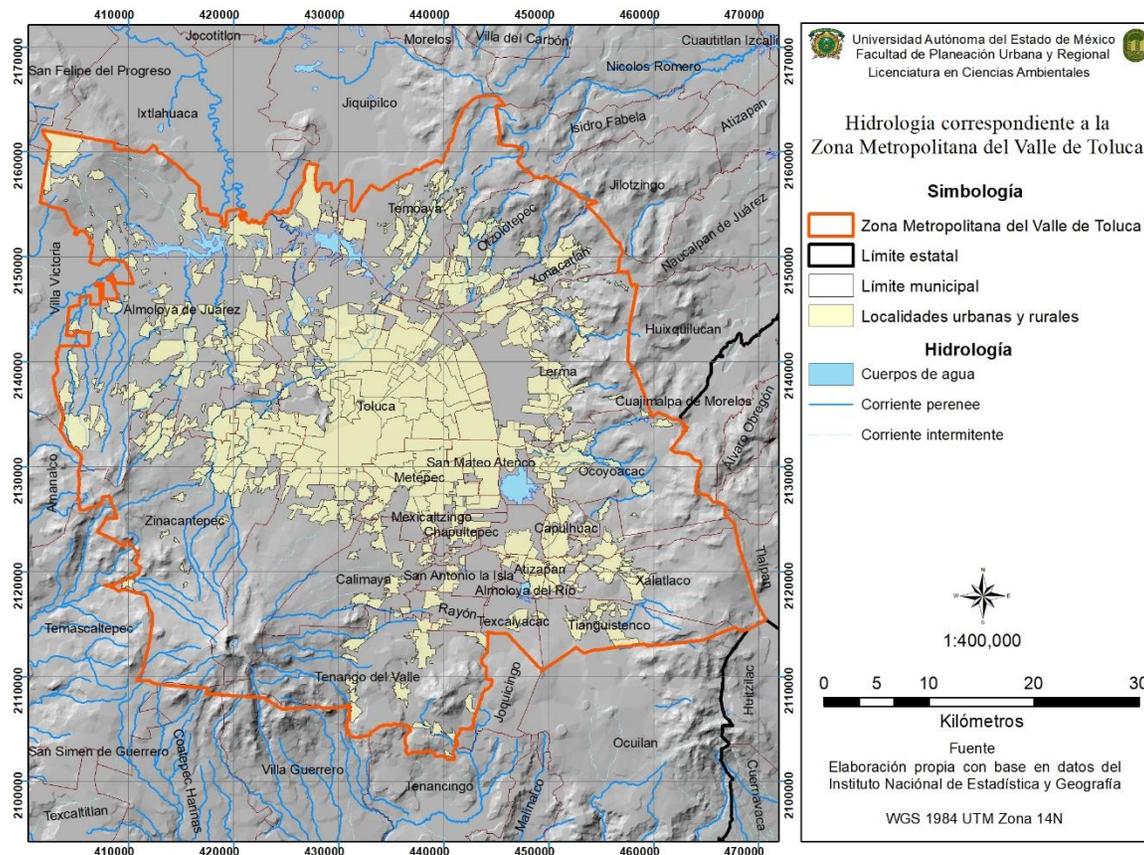


*Mapa 3.4 Rangos de altitud en la ZMVT.
Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2017).*

El norte de la zona centro se encuentra conformado por lomeríos de tobas y basalto, mientras que la zona sur se encuentran llanuras aluviales y zonas lacustres de piso rocoso o cementado, esta última debido a la presencia del APFF Ciénegas del Lerma (INEGI, 2017).

3.2.4 Hidrología de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

La ZMVT forma parte de la región hidrológica Lerma – Santiago (Mapa 3.5), y la cuenca Río Lerma – Toluca (INEGI, 2020), además dentro de la región se encuentran cuerpos de agua perennes que forman parte importante de la dinámica social y ambiental que se desarrolla en el sitio.



3.2.5 Sistema de edificaciones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

El sistema de edificaciones de la ZMVT abarca aproximadamente el 30% del territorio de la zona metropolitana, además, de acuerdo con lo citado por el Centro Mario Molina (2014), basado en datos de SEDESOL (2012), se sabe que entre los años de 1980 y 2010 el uso de suelo urbano creció 26.9 veces, mientras que la población aumento 3.4 veces su tamaño.

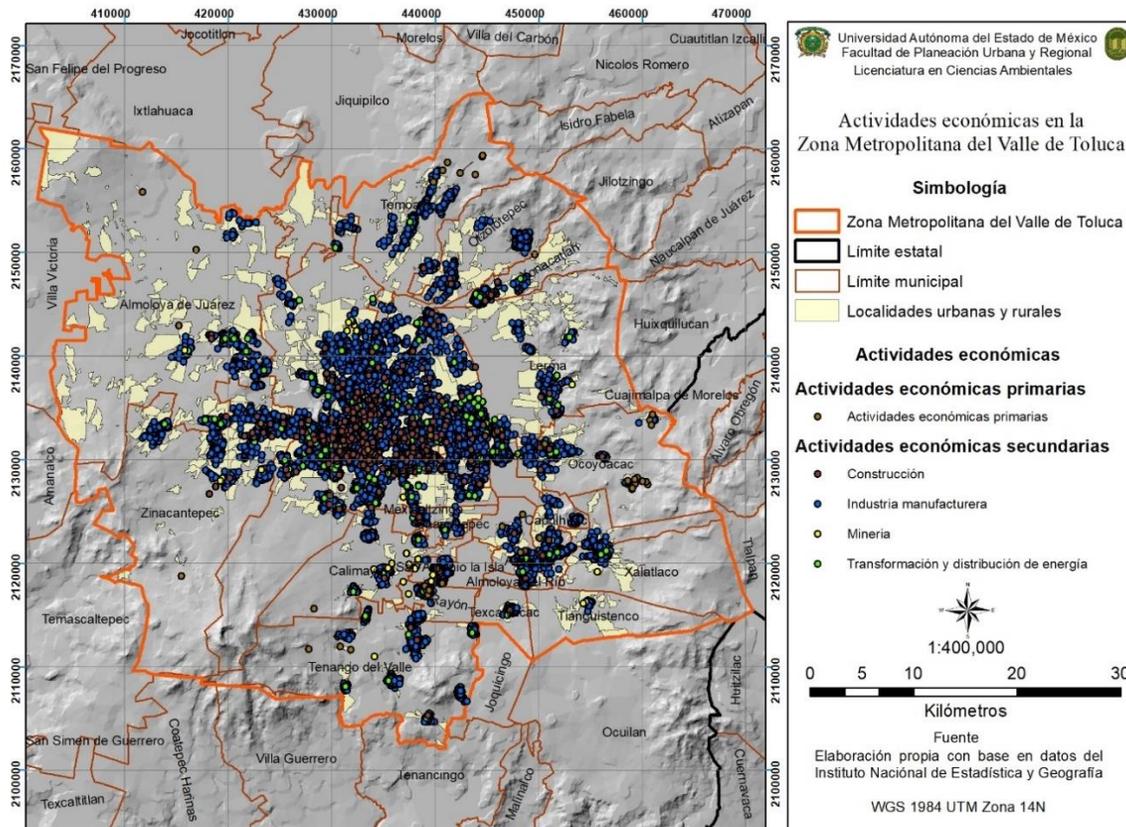
Se debe considerar también, que para el año de 1980 la ZMVT solo estaba conformada por los municipios de Toluca, Metepec y Zinacantepec, posteriormente,

en el año 2000 se incluyen 9 municipios más: Almoloya de Juárez, Calimaya, Chapultepec, Lerma, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Oztolotepec, San Mateo Atenco y Xonacatlan. En el año 2005 se agregan los municipios de Rayón y San Antonio la Isla, y finalmente en 2009 se aprobó la declaratoria de la ZMVT integrada por los 22 municipios actuales (IGCEM, 2017).

Los municipios que presentan una mayor densidad de superficie construida, basado en área total del territorio municipal y la superficie construida son los municipios de Toluca, Metepec, San Mateo Atenco, Almoloya de Juárez, Xonacatlán, Lerma, Chapultepec, Capulhuac, Atizapán y Santiago Tianguistenco (INEGI, 2017).

3.3. Actividades económicas de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

A nivel federal, el Estado de México contribuye en un 9.1% del total nacional del Producto Interno Bruto, esta contribución se realiza a partir del desarrollo de actividades económicas en el territorio estatal (Mapa 3.6).



Mapa 3.6 Unidades económicas en la ZMVT, agrupadas por tipo de actividad. Fuente: INEGI (2020).

3.3.1 Actividades económicas primarias

Para el caso de la ZMVT, se cuenta con unidades económicas destinadas a la agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza, distribuidas en los municipios de Almoloya de Juárez, Zinacantepec, Metepec, Ocoyoacac, Rayón, Calimaya, Capulhuac, Chapultepec, Temoaya, Rayón, Xonacatlán, Tenango del Valle y Tianguistenco, tal como se observa en el Mapa 3.6 (INEGI, 2020).

3.3.2 Actividades económicas secundarias

Las actividades secundarias son predominantes en los municipios que integran la ZMVT (Mapa 3.6), pues se cuenta con unidades económicas destinadas a la minería, la construcción, la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas, así como industrias manufactureras (INEGI, 2020). Para el caso de las industrias, dentro de la ZMVT se encuentran los siguientes parques industriales:

Municipio	Parque(s)
Capulhuac	Parque Industrial PYME Capulhuac Parque Industrial San Nicolás Tlazala
Lerma	Corredor Industrial Lerma Microparque Industrial O'donnell Logistic Parque Industrial Cerillo I Parque Industrial Cerillo II Parque Industrial FRISA (Doña Rosa) Parque Industrial Lerma Prologis Park Toluca
San Antonio la Isla	Parque Agroindustrial San Antonio La Isla
Tenango del Valle	Parque Industrial Tenango del Valle
Tianguistenco	Parque Industrial Santiago Tianguistenco I y II
Toluca	Parque Industrial El Coecillo Parque Industrial Exportec I Parque Industrial Exportec II Parque Industrial San Antonio Buenavista Parque Industrial San Cayetano Parque Industrial Toluca Parque Industrial Toluca 2000 Parque Industrial Vesta Park Toluca Zona Industrial Toluca

*Tabla 3.2 Parques industriales en la ZMVT.
Fuente: Secretaría de Economía (2016).*

De acuerdo con la Tabla 3.2, se puede decir que la mayor concentración de industrias se encuentra en el centro de la ZMVT, principalmente en los municipios de Toluca y Lerma, lo que se corrobora con el Mapa 3.6, donde se observa la distribución geográfica de las diferentes actividades económicas correspondientes al sector secundario, evidenciando que la industria manufacturera es predominante en el área de estudio.

Para el caso de estudio, conocer la distribución geográfica de las unidades económicas es importante, ya que estas actividades pueden identificarse como fuentes fijas de contaminantes atmosféricos, los cuales influyen en la formación del fenómeno de las Islas de calor.

Capítulo 4

Resultados y observaciones



Capítulo 4. Resultados y observaciones

En el presente capítulo se presentan los resultados y observaciones obtenidos al llevar a cabo una metodología específica para la identificación de la Isla de Calor de superficie en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Para llevar a cabo el análisis de la temperatura superficial, se recopilaron 24 imágenes del satélite Sentinel 3, las imágenes seleccionadas fueron elegidas de acuerdo con la época del año y un día representativo, donde estas tuvieran un porcentaje menor al 20% de nubosidad, permitiendo un análisis adecuado de la temperatura superficial; para cada estación se recopilaron dos imágenes una diurna y una nocturna.

Estas imágenes se presentan a continuación en forma de mapas temáticos, ordenados por época (primavera 2018 a 2020, verano 2018 a 2020, otoño 2018 a 2020 e invierno 2018 a 2020), dentro de cada época se muestran en primer lugar los resultados para las imágenes diurnas y posteriormente los resultados de las temperaturas nocturnas, además se realiza un análisis general de las temperaturas que se presentaron durante los tres años para el caso diurno y nocturno de cada temporada.

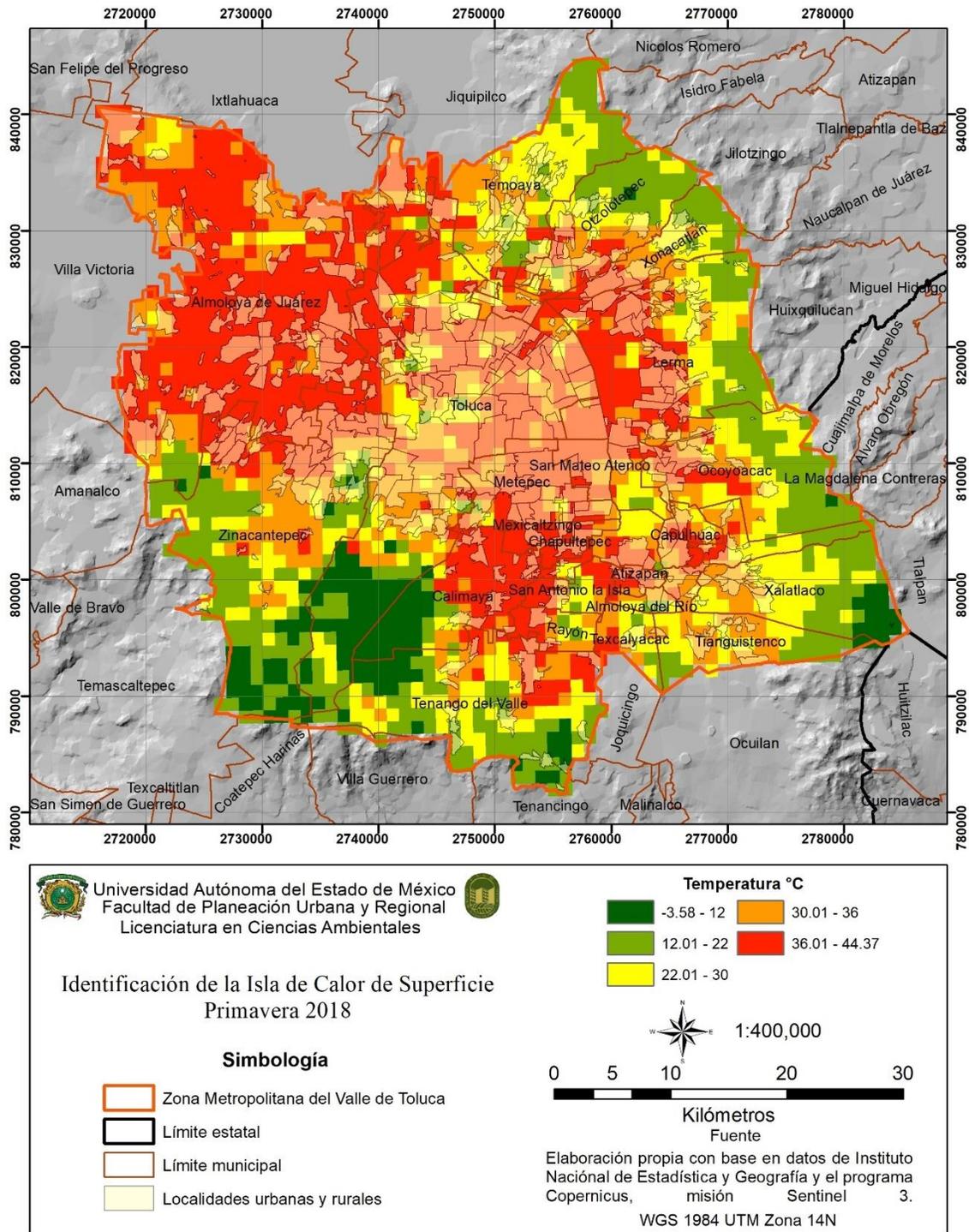
Además, se realiza un análisis de correlación entre espacios urbanos, vegetación y temperatura para cada estación, esto con ayuda del software SNAP® y las imágenes satelitales previamente obtenidas del satélite Sentinel 3, se obtienen diagramas de dispersión utilizando como variable dependiente la temperatura superficial registrada en el periodo diurno, mientras que la variable independiente corresponde a la información del índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI), que usualmente se encuentra entre -1 y 1, donde los valores positivos y cercanos a 0 representan áreas sin vegetación aparente y/o urbanizaciones, mientras que valores mayores a 0.3 corresponden a zonas con vegetación (ESA, 2020).

Es importante aclarar que debido a las limitaciones que presenta el software utilizado para la realización de estos diagramas, se realizaron con un cuadro de información que incluye datos que se encuentran fuera de los límites del área de estudio, afectando la distribución de puntos y rangos en los diagramas, por lo que el análisis se realizará basado en los rangos de información que proporcionan los mapas de temperatura acotados a los límites territoriales que delimitan la zona de estudio.

Para cerrar el capítulo, se muestra un análisis general de las temperaturas superficiales registradas por año.

4.1 Temperatura superficial primavera

4.1.1 Primavera diurna 2018



Mapa 4.1 Identificación de la Isla de Calor diurna, primavera 2018.
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

Para el caso de la primavera de 2018, sus registros de temperatura superficial para el día 28 de abril muestran que el rango más alto de temperatura superficial se encuentra entre 36.01 y 44.37 °C y cubre la mayor parte del territorio correspondiente al municipio de Almoloya de Juárez, así como la zona norte del municipio de Toluca, el oeste del municipio de Lerma y los municipios de Metepec, Mexicaltzingo, Chapultepec, Calimaya, Atizapán, Capulhuac, San Antonio la Isla, Rayón y Tenango del Valle.

Mientras que las temperaturas superficiales más bajas se registraron en un rango de 3.58 – 12 °C y se localizan al sureste de Xalatlaco, al sur de Toluca, Zinacantepec, Calimaya, así como el noroeste y sureste de Tenango del Valle.

Temperatura °C	Hectáreas	%
-3.58 - 12	15688.15	5.81%
12.01 – 22	49243.28	18.24%
22.01 – 30	47443.99	17.57%
30.01 – 36	54974.76	20.36%
36.01 – 44.37	102681.85	38.03%

Tabla 4.1 Área ocupada por temperaturas, primavera diurna 2018.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.1

Área ocupada por temperaturas registradas

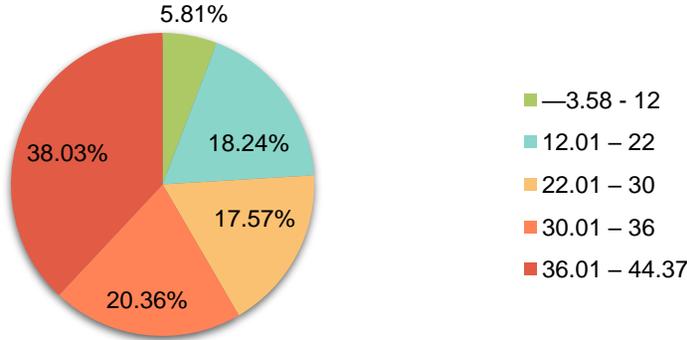
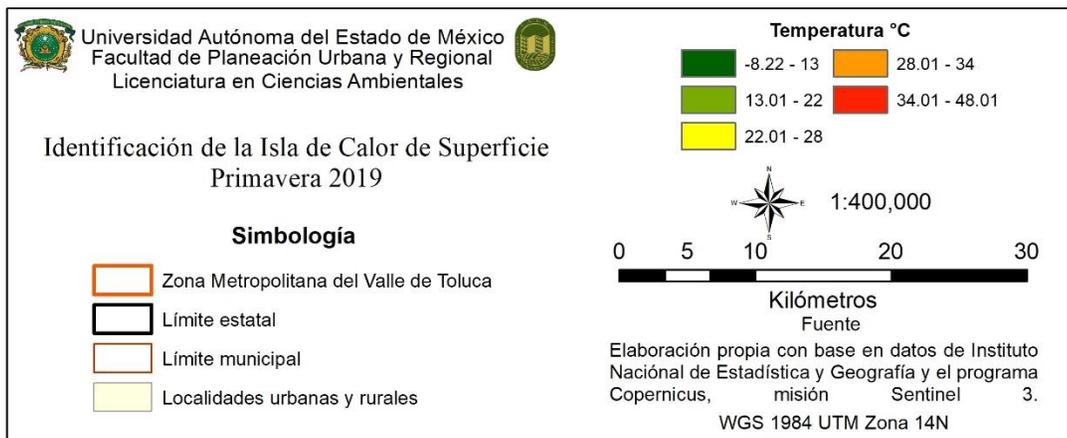
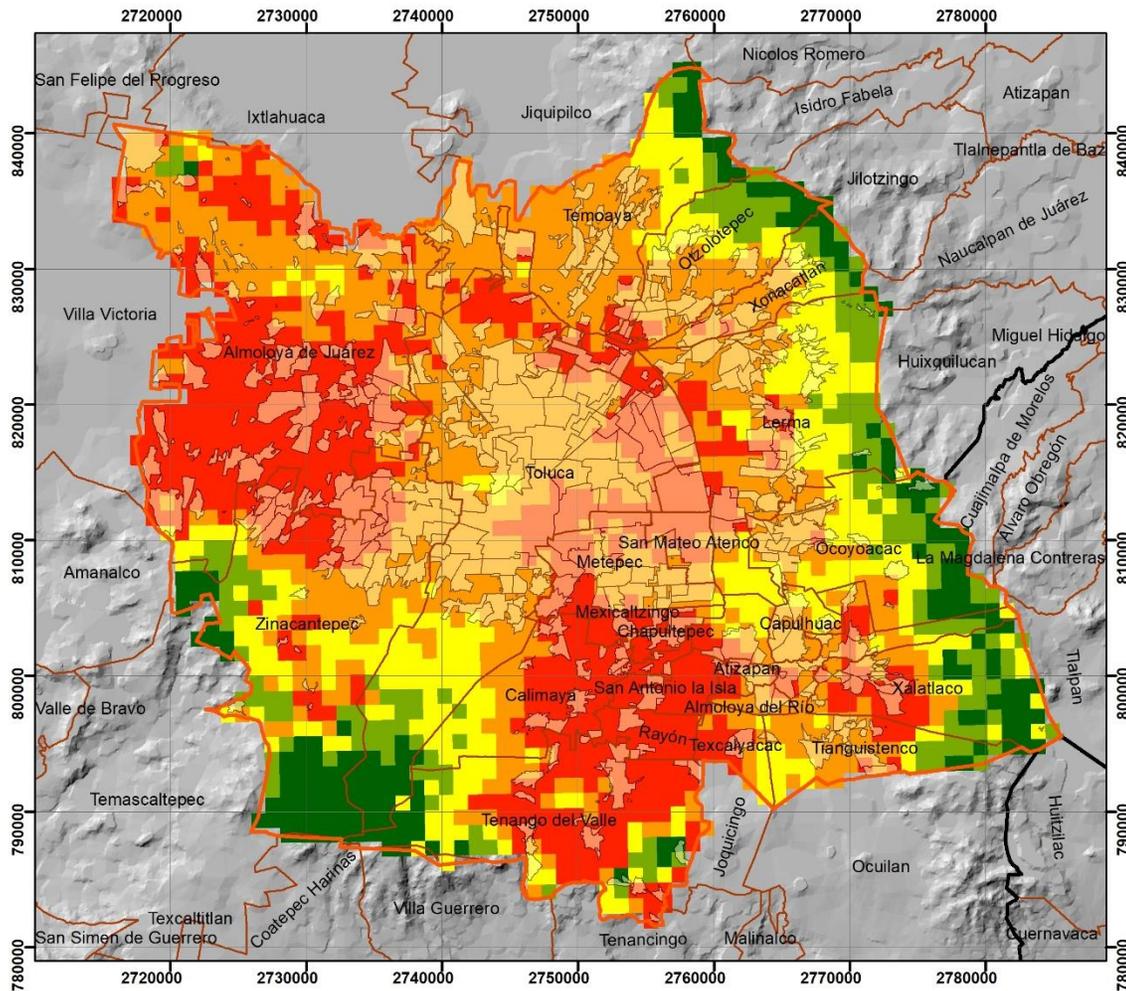


Gráfico 4.1 Área ocupada por temperaturas, primavera diurna 2018
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.1, Mapa 4.1

La temperatura que predomina en la ZMVT en términos de superficie es la correspondiente al rango de 36.01 a 44.37 °C con un porcentaje del área total igual al 38.03%, mientras que el rango con el porcentaje de temperatura más bajo corresponde al rango de -3.58 a 12 °C con un porcentaje del 5.81%.

4.1.2 Primavera diurna 2019



Mapa 4.2 Identificación de la Isla de Calor diurna, primavera 2019.
 Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

El día 30 de abril de 2019, se registró una máxima de temperatura superficial correspondiente al rango de 34.01 a 48.01 °C, que de acuerdo con el Mapa 4.2, este rango de temperatura cubre principalmente la zona de Almoloya de Juárez, el norte de Zinacantepec, así como la zona noreste del municipio de Toluca y la zona sur de la ZMVT.

Por otra parte, el rango de temperaturas más bajas se encuentra entre -8.22 y 13 °C y se localiza en la zona este de la ZMVT específicamente en los municipios de Temoaya, Oztolotepec, Xonacatlán, Lerma, Ocoyoacac, Xalatlaco y Tianguistenco, además de la zona suroeste en los municipios de Zinacantepec, Toluca y Tenango del Valle.

Temperatura °C	Hectáreas	%
-8.22 – 13	20172.09	7.44%
13.01 – 22	20711.40	7.64%
22.01 – 28	40703.30	15.01%
28.01 – 34	102548.75	37.81%
34.01 – 48.01	87050.55	32.10%

Tabla 4.2 Área ocupada por temperaturas, primavera diurna 2019
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.2

Área ocupada por temperaturas registradas

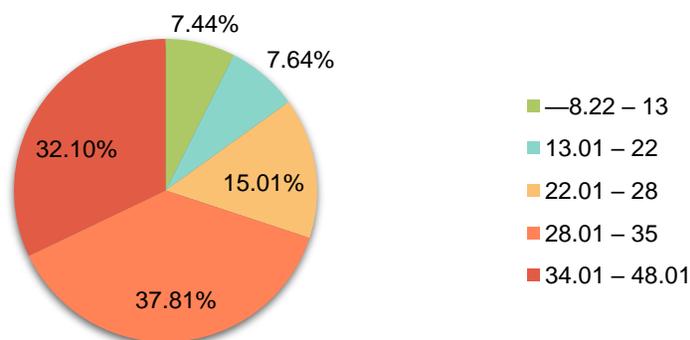
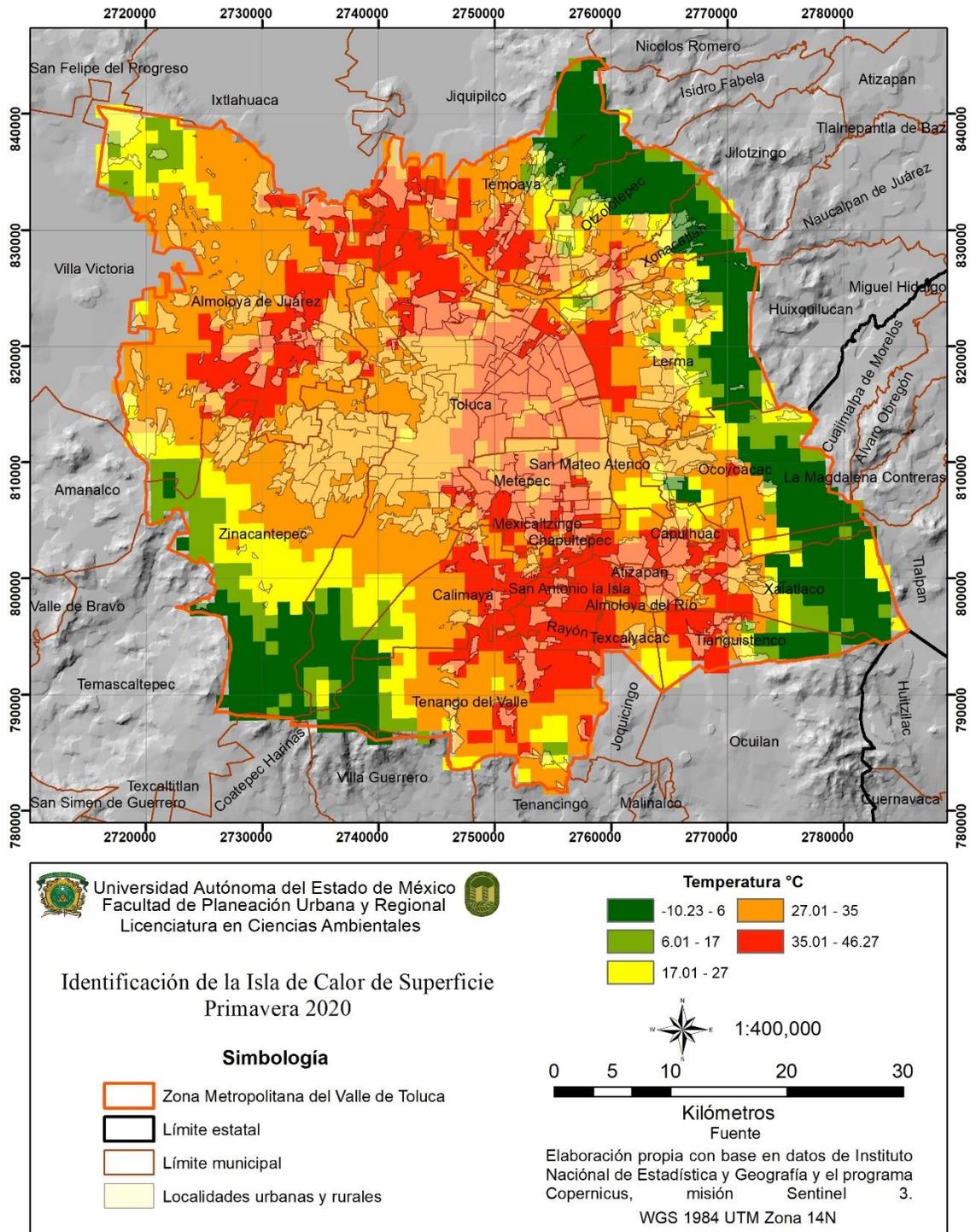


Gráfico 4.2 Área ocupada por temperaturas, primavera diurna 2019
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.2, Mapa 4.2

De acuerdo con los datos del mapa y la tabla 4.2, el rango de temperatura que ocupa una mayor superficie de la ZMVT se encuentra entre 28.01 y 35 °C, dado que ocupa el 37.81% de la zona de estudio, mientras que la temperatura que ocupa un menor porcentaje de área es la que corresponde a los rangos de -8.22 a 13 °C y 13.01 a 22 °C, ocupando un área de 7.44% y 7.64% respectivamente.

4.1.3 Primavera diurna 2020



Mapa 4.3 Identificación de la Isla de Calor diurna, primavera 2020.
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

Para el día 27 de abril, correspondiente a la primavera de 2020, se identifican rangos de temperatura superficial en los cuales el mínimo registrado oscila entre -10.23 a 6 °C, sobre la zona suroeste de la ZMVT, al sur de los municipios de Almoloya de Juárez, Zinacantepec, Toluca, Calimaya y Tenango del Valle, así como al noreste de los municipios de Temoaya, Oztolotepec, Xonacatlán y al este de los municipios de Lerma, Ocoyoacac, Xalatlaco y Tianguistenco. Por otra parte, el rango de temperatura más elevada se registra entre 35.01 a 46.27 °C, y se localizan en la zona centro de Almoloya de Juárez, al norte del municipio de Toluca, sobre los municipios de Metepec, Mexicaltzingo, Chapultepec, San Antonio la Isla, Atizapán, Rayón y Capulhuac, la zona este de Calimaya y al centro y norte de Tenango del Valle, así como en la zona sur de Temoaya y el oeste de Lerma, Tianguistenco.

Temperatura °C	Hectáreas	%
-10.23 – 6	40846.18	15.16%
6.01 – 17	17656.35	6.55%
17.01 – 27	29701.53	11.02%
27.01 – 35	111179.19	41.26%
35.01 – 46.27	70089.18	26.01%

Tabla 4.3 Área ocupada por temperaturas, primavera diurna 2020
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.3.

Área ocupada por temperaturas registradas

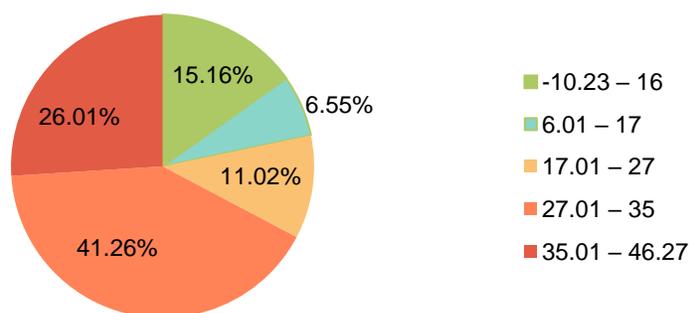
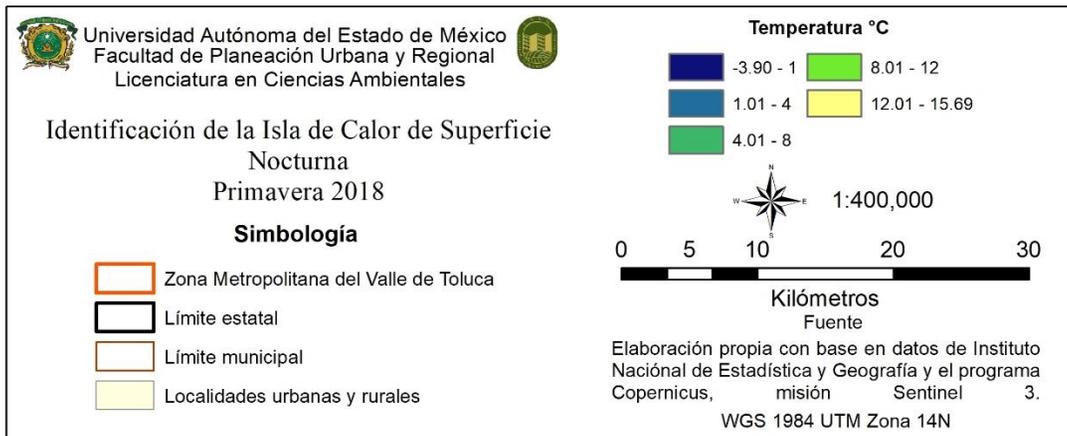
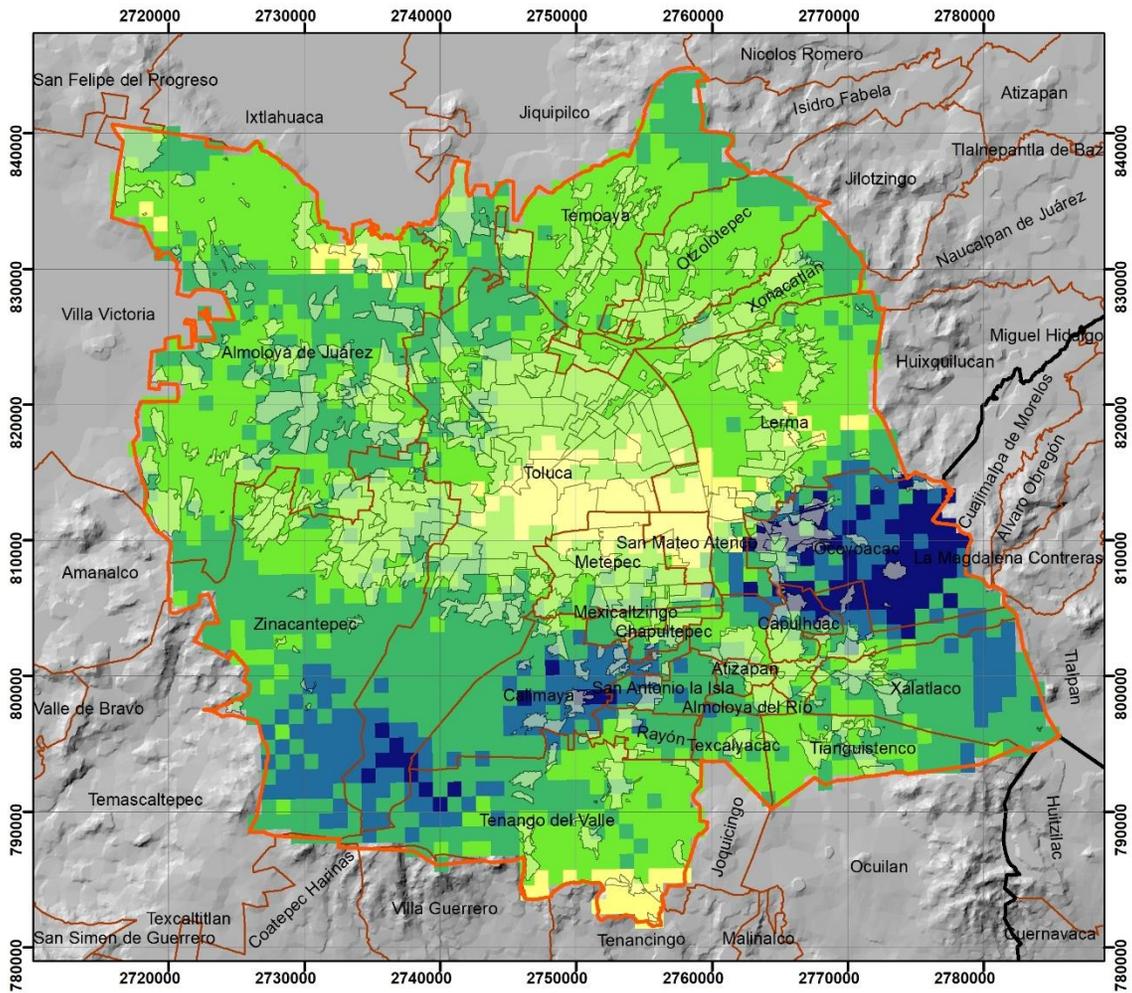


Gráfico 4.3 Área ocupada por temperaturas, primavera diurna 2020
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.3, Mapa 4.3.

De acuerdo con el gráfico 4.3, el rango de temperatura que ocupa una mayor superficie en la zona de estudio es el correspondiente a 27.01 – 35 ° C con un 41.26%, mientras que el área de las superficies que presentan una temperatura de entre 6.01 y 17 °C ocupan la menor superficie, con un porcentaje del 6.55%.

4.1.4 Primavera nocturna 2018



*Mapa 4.4 Identificación de la Isla de Calor nocturna, primavera 2018.
 Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.*

Para el caso de la Isla de Calor nocturna, se tomaron los registros de temperatura superficial correspondientes a la noche del 30 de abril del 2018, donde se reportaron las temperaturas descritas en la Tabla 4.4, donde se indica que el rango de temperatura más elevada se encuentra entre los 12.01 y 15.69 °C y de acuerdo con el Mapa 4.4, este rango de temperatura se localiza principalmente en el municipio de San Mateo Atenco, el centro de Toluca, el norte de Metepec, Almoloya de Juárez y el sur de Lerma y Tenango del Valle.

Mientras que la temperatura superficial más baja se sitúa principalmente en el municipio de Ocoyoacac, el norte de Capulhuac, Tianguistenco, Tenango del Valle, así como el centro de Calimaya y el sur del municipio de Toluca.

Temperatura °C	Hectáreas	%
—3.90 - 1	9837.54	3.66%
1.01 - 4	22409.76	8.35%
4.01 - 8	97557.19	36.33%
8.01 - 12	124121.07	46.22%
12.01 – 15.69	14605.46	5.44%

Tabla 4.4 Área ocupada por temperaturas, primavera nocturna 2018
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.4

Área ocupada por temperaturas registradas

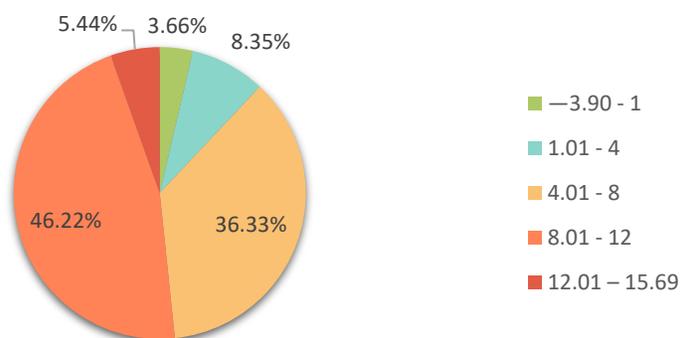
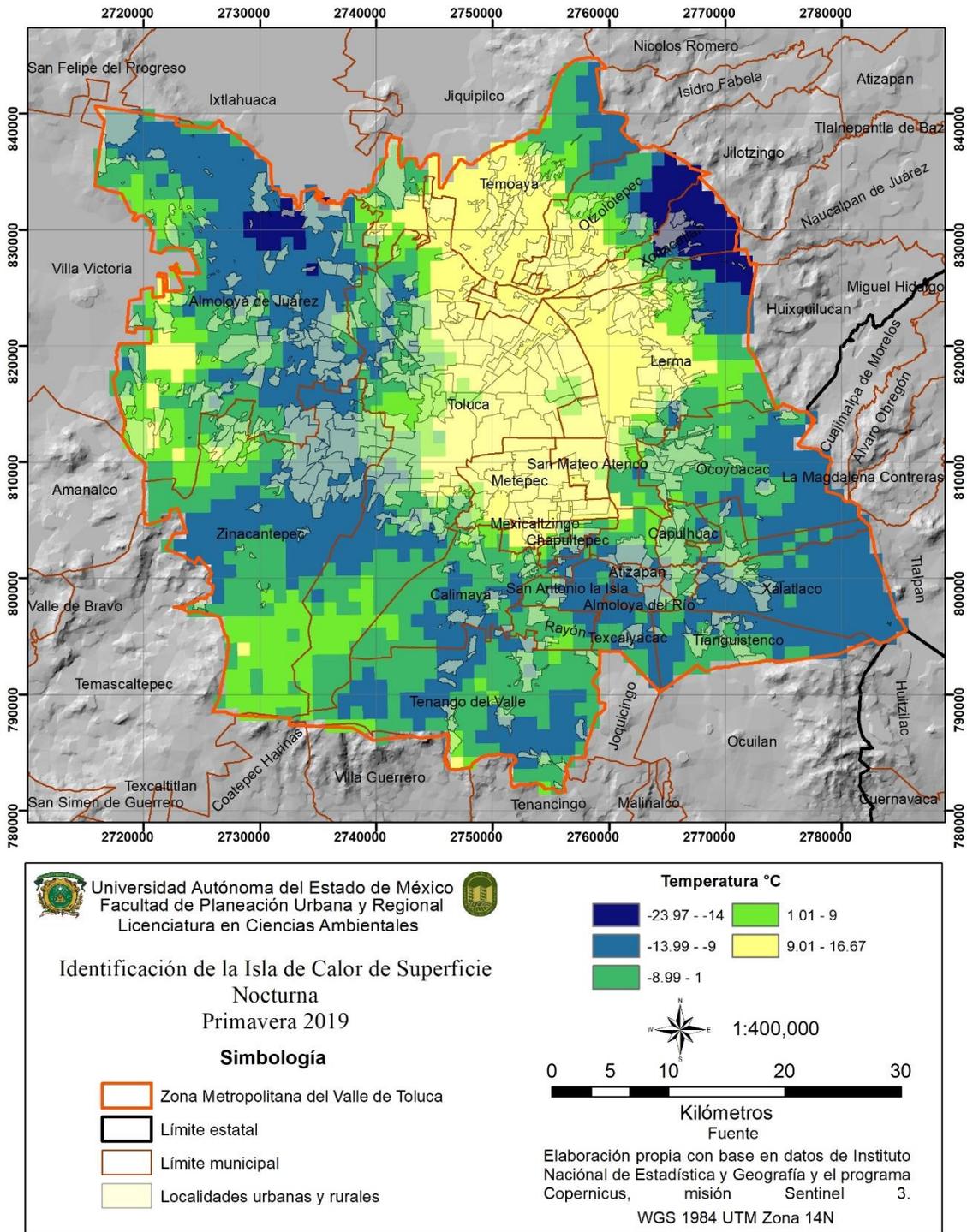


Gráfico 4.4 Área ocupada por temperaturas, primavera nocturna 2018
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.4, Mapa 4.4

En cuanto al rango de temperatura superficial que predomina en la ZMVT corresponde al rango situado entre 8.01 y 12 °C, con un porcentaje de 46.22% del total del área de estudio, mientras que el rango de temperatura que menos se presenta se sitúa entre -3.90 y 1 °C con un porcentaje igual a 3.66%.

4.1.5 Primavera nocturna 2019



*Mapa 4.5 Identificación de la Isla de Calor nocturna, primavera 2019.
 Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020*

Por otra parte, la durante la noche del 30 de abril del 2019, se obtuvieron los registros de temperatura que se muestran en el Mapa 4.5, donde se observa que el rango de temperatura superficial más elevada se encuentra en los municipios de Metepec, Mexicaltzingo, San Mateo Atenco, el norte de Toluca, el oeste de Lerma, Xonacatlán, Almoloya de Juárez y el sur de Temoaya y Oztolotepec, con un rango de temperatura que oscila entre los 9.01 y 16.67 °C.

Mientras que el rango de temperatura más bajo, que se encuentra entre -23.97 y -14 °C, se sitúa en la zona norte de los municipios de Almoloya de Juárez, Oztolotepec, Xonacatlán y Lerma.

Temperatura °C	Hectáreas	%
—23.97 - —14	20172.09	2.96%
—13.99 - —9	20711.40	32.58%
—8.99 - 1	40703.30	31.66%
1.01 - 9	102548.75	12.56%
9.01 - 16.67	87050.55	20.21%

Tabla 4.5 Área ocupada por temperaturas, primavera nocturna 2019.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.5

Área ocupada por temperaturas registradas

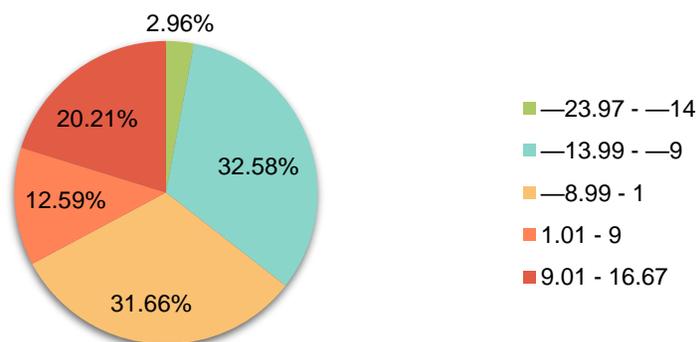


Gráfico 4.5 Área ocupada por temperaturas, primavera nocturna 2019.
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.5, Mapa 4.5

El rango de temperatura que tiene una menor presencia en la ZMVT se sitúa entre los -23.97 y -14 °C con un porcentaje del 2.96% del total correspondiente a la zona de estudio, mientras que los rangos de temperatura superficial que predominan oscilan entre -13.99 a -9 °C y -8.99 a 1 °C, con porcentajes de área equivalentes al 32.58% y 31.66% respectivamente (Gráfico 4.5).

En el caso de la Isla de Calor nocturna, se registraron los datos de temperatura superficial de la noche del 29 de abril del 2020, donde se observa que el rango más elevado se sitúa al norte del municipio de Toluca, Lerma, Atizapán, la zona centro-sur de Temoaya, Metepec, Capulhuac, Almoloya del Río, el suroeste de Oztolotepec, Xonacatlán, Ocoyoacac además de la zona sureste del municipio de San Mateo Atenco, con temperaturas que oscilan entre los 6.01 y 13.72 °C.

Mientras que el rango de temperatura superficial más baja oscila entre los -19.36 y - 11 °C se presenta en la zona norte de San Mateo Atenco, Ocoyoacac, el noroeste del municipio de Almoloya de Juárez, en el oeste de Temoaya, el centro de Toluca, el noreste del municipio de Zinacantepec, al este del municipio de Xalatlaco y el centro-sur del municipio de Lerma.

Temperatura °C	Hectáreas	%
—19.36 - —11	65139.85	24.23%
—10.99 - —6	74064.10	27.54%
—5.99 - 1	68140.19	25.34%
1.01 - 6	26056.69	9.69%
6.01 – 13.72	35487.01	13.20%

Tabla 4.6 Área ocupada por temperaturas, primavera nocturna 2019.

Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.6

Área ocupada por temperaturas registradas

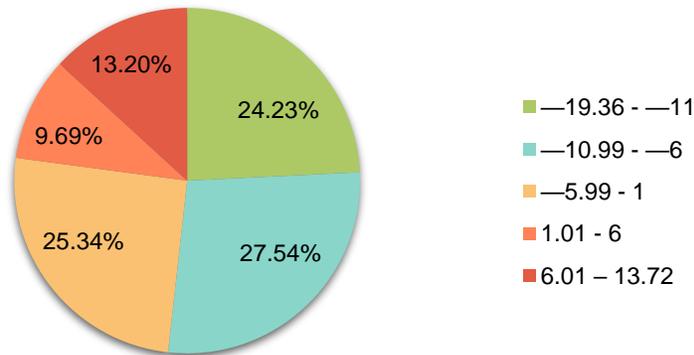


Gráfico 4.6 Área ocupada por temperaturas, primavera nocturna 2019.

Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.6, Mapa 4.6

De acuerdo con el Gráfico 4.6, el rango de temperatura superficial que predomina en la ZMVT se encuentra entre los -10.99 y -6 °C, ocupando un 27.54% del total de la zona de estudio, mientras que el 9.69% del territorio es ocupado por temperaturas superficiales que oscilan entre los 1.01 y 6 °C.

4.1.7 Análisis de temperatura superficial primavera diurna 2018 – 2020

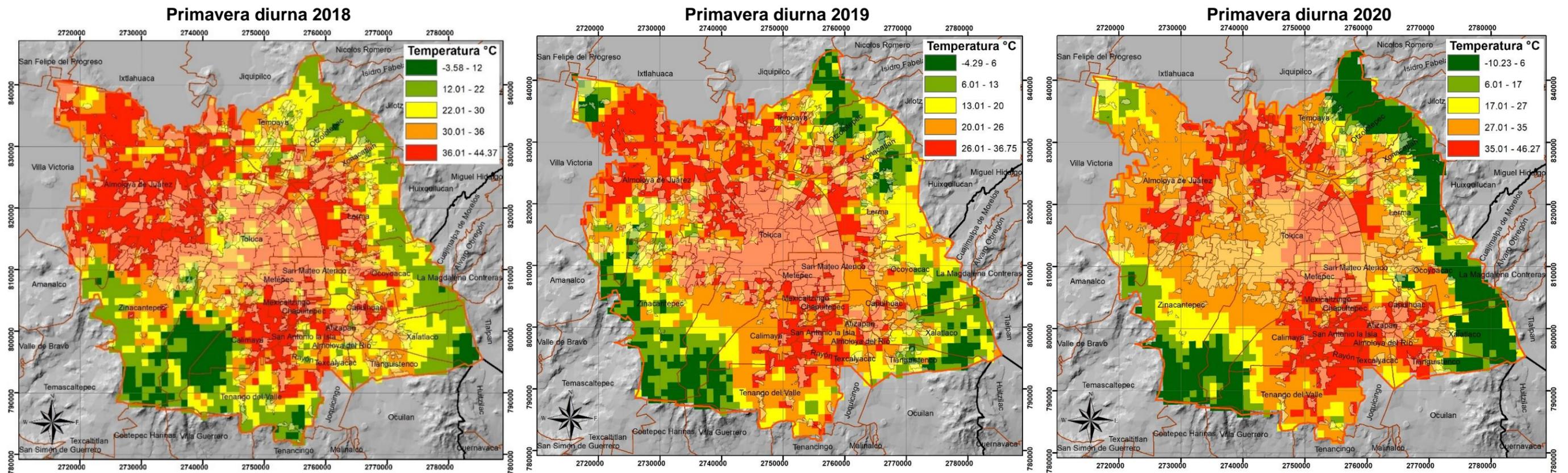


Imagen 4.1 Análisis de temperatura superficial correspondiente a la temporada de primavera diurna de los años 2018- 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3 e INEGI 2020.

De acuerdo con los datos registrados para la primavera de 2020, 2019 y 2018, se observa que el año que registró una mayor temperatura superficial fue 2019, con una temperatura de hasta 48.01 °C que se distribuye principalmente en los municipios de Almoloya de Juárez y la zona centro – sureste de la ZMVT. Sin embargo, el año 2018 es el que presenta una mayor área ocupada por el rango de temperaturas más elevadas (entre 36.01 y 44.37 °C).

Por otra parte, la distribución espacial de la temperatura es similar para el caso de los años 2019 y 2020, pues en estos casos la temperatura tiende a ser más elevada en el centro de la ZMVT y disminuye gradualmente a los extremos, mientras que la distribución para el año 2018 muestra cambios más abruptos de temperatura y zonas frías dentro de las áreas con mayor temperatura. También se puede observar que el año que presenta temperaturas más bajas es 2020, con temperaturas superficiales que oscilan entre los -10.23 y 6 °C que ocupan un porcentaje del área total del 15.16%, que es el mayor porcentaje de ocupación para los tres años, siendo el año 2018 en el que se presenta una menor ocupación del área total en el rango de temperatura superficial más baja.

Sin embargo, en los tres años se puede notar que los rangos de temperatura más elevada se localizan sobre las zonas urbanas que predominan la zona central de la ZMVT, mientras que áreas con un uso de suelo diferente muestran una temperatura superficial significativamente menor.

4.1.8 Análisis de temperatura superficial primavera nocturna (2018 – 2020)

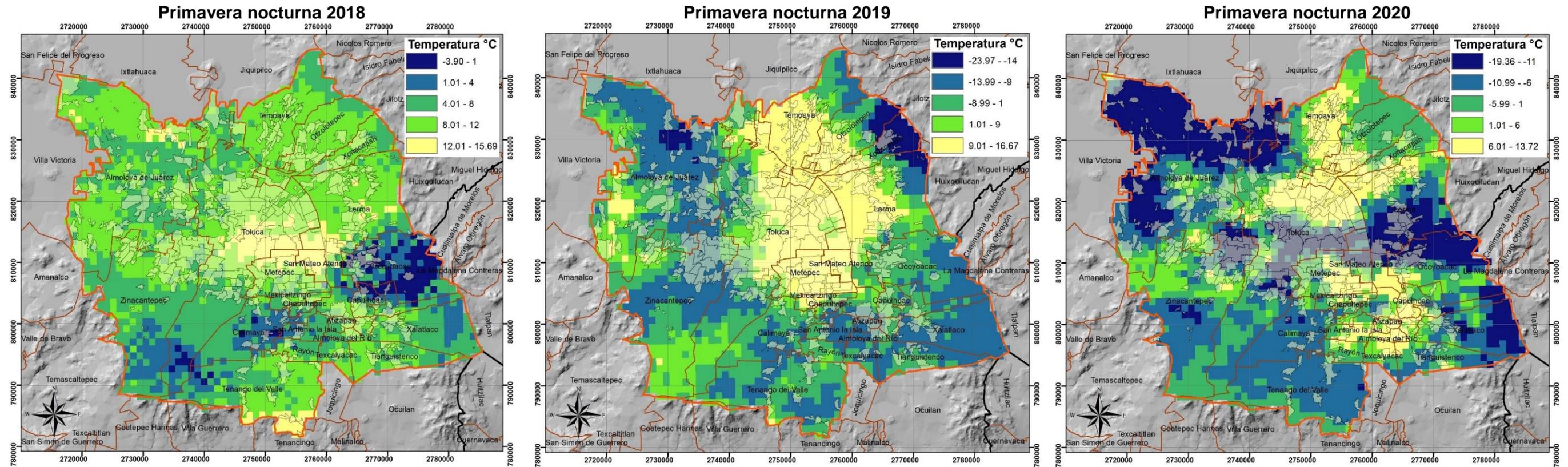


Imagen 4.2 Análisis de temperatura superficial correspondiente a la temporada de primavera nocturna de los años 2018- 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3 e INEGI 2020.

Los resultados obtenidos para las Islas de Calor nocturnas muestran la una concentración de las temperaturas más elevadas en la zona centro y noreste de la ZMVT, con temperaturas por encima de los 6°C, siendo la noche de primavera 2020 la más fresca con una temperatura máxima de 13.72 °C.

En la Imagen 4.2 se observa la comparación de los 3 años y se puede distinguir que los asentamientos humanos son los que registran las temperaturas más elevadas, mientras que la periferia registra temperaturas superficiales considerablemente más bajas.

Las temperaturas más bajas para esta época llegaron a registrarse hasta en -23.97 °C para el caso de la primavera de 2019 y varían entre -3.90 y -19.36 °C para los casos de 2018 y 2020 respectivamente; además se puede observar que estas temperaturas se registran en la periferia de la ZMVT, generalmente donde se obtuvieron registros de vegetación abundante.

4.1.9 Correlación vegetación y espacios urbanos vs temperatura primavera diurna 2018 – 2020.

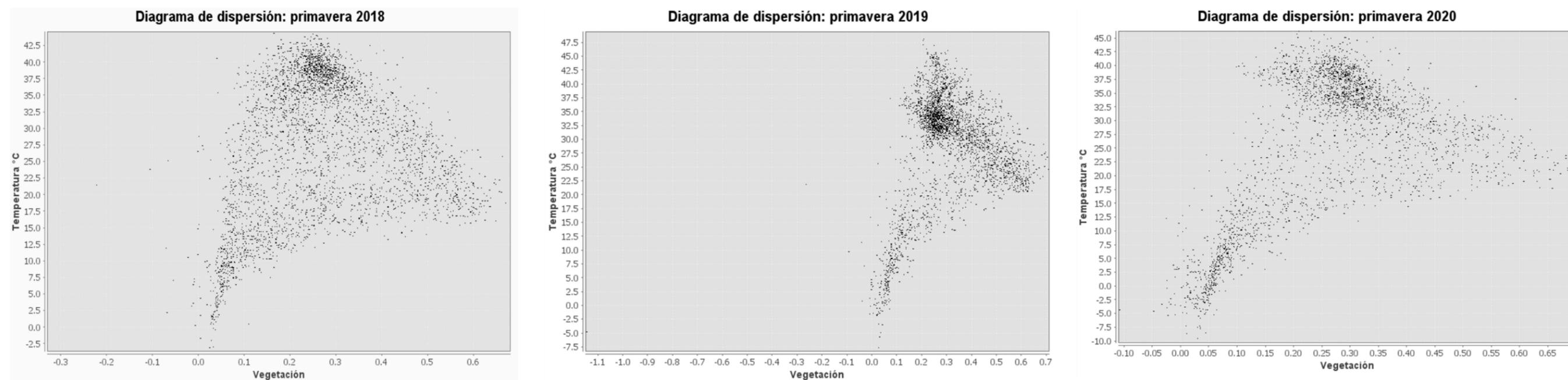


Imagen 4.3 Correlación vegetación / temperatura primavera diurna 2018 – 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3.

En la Imagen 4.3 se presentan los diagramas de dispersión correspondientes a los registros diurnos de temperatura superficial para la primavera de 2018, 2019 y 2020, en los tres diagramas se observa que el patrón de distribución de los datos muestra una acumulación de puntos en la zona superior, en el rango de temperatura mayor que 30 °C.

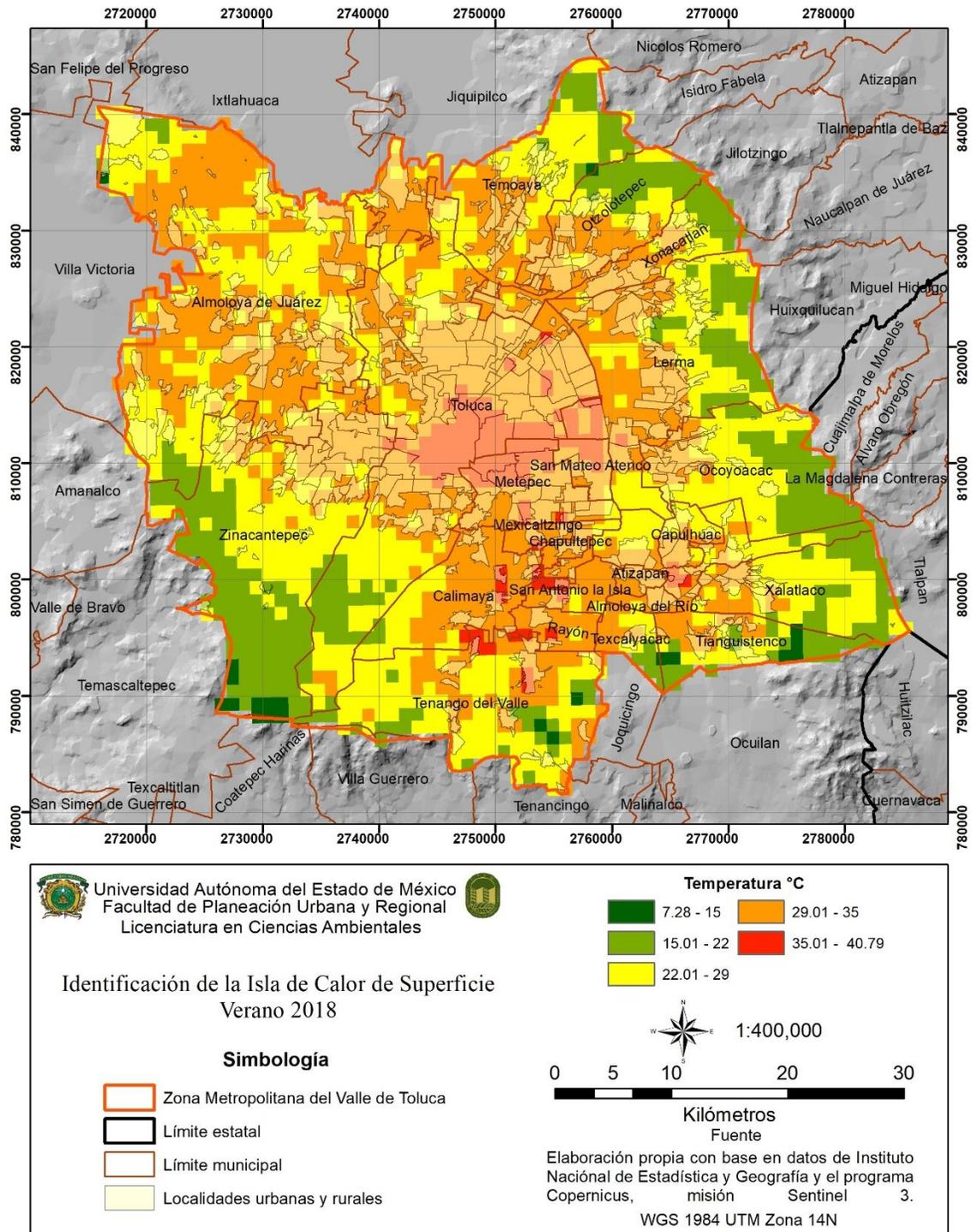
La dispersión de puntos en el diagrama de la primavera de 2018 muestra un patrón claramente parabólico que responde a una ecuación cuadrática, mostrando una mayor concentración de puntos hacia el vértice de la parábola, que se ubica en valores bajos de vegetación y altos de temperatura, mostrando desde otra perspectiva los datos arrojados por los mapas de temperatura superficial, y realizando el contraste del tipo de cobertura y uso de suelo que se presenta en cada zona y la temperatura que esta presenta.

Este patrón se repite en el caso de la primavera de 2019 y 2020, pues la mayor concentración de puntos del diagrama se localiza en zonas con un bajo nivel de vegetación y muy altos registros de temperatura superficial. Dado que las zonas con bajo nivel de vegetación corresponden generalmente a áreas urbanizadas o rocosas, podemos decir que existe una relación entre el nivel de vegetación o la ausencia de esta y el aumento de la temperatura superficial.

Además, notamos que la parábola se abre hacia valores de NDVI (vegetación) que corresponden a zonas de cuerpos de agua o vegetación abundante, a la vez que disminuye la temperatura.

4.2 Temperatura superficial verano

4.2.1 Verano diurno 2018



Mapa 4.7 Identificación de la Isla de Calor diurna, verano 2018.
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

En el mapa 4.7 se presentan los registros de temperatura superficial obtenidos de la tarde del 30 de julio de 2018, donde el rango de temperaturas más altas se registró entre 35.01 y 40.79 °C, localizadas en la zona centro del municipio de Toluca, el norte de Metepec, San Mateo Atenco, Tenango del Valle, San Antonio la Isla y el sur de Lerma, Calimaya y Rayón.

Por otra parte, las temperaturas más bajas se localizan en la superficie de la zona sur del municipio de Zinacantepec, Tianguistenco, Tenango del Valle, así como el norte de Almoloya de Juárez y Temoaya, estas temperaturas se encuentran en un rango de 7.28 y 15 °C.

Temperatura °C	Hectáreas	%
7.28 – 15	2466.65	0.91%
15.01 – 22	42490.52	15.67%
22.01 – 29	96343.70	35.53%
29.01 – 35	117802.90	43.44%
35.01 – 40.79	12088.97	4.46%

Tabla 4.7 Área ocupada por temperaturas, verano diurno 2018.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.7.

Área ocupada por temperaturas registradas

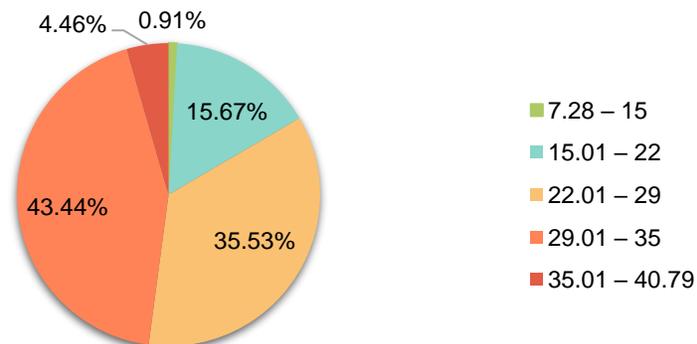
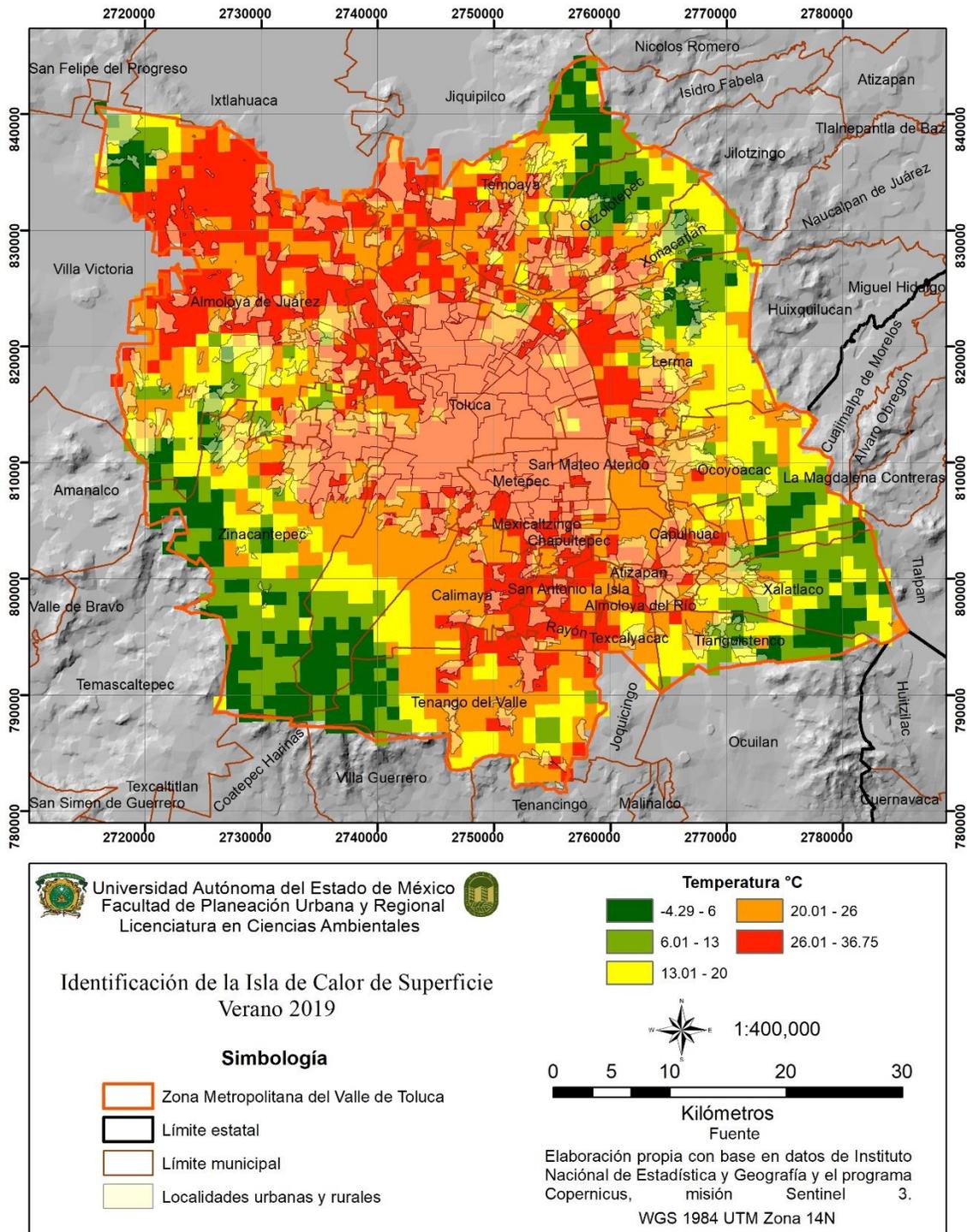


Gráfico 4.7 Área ocupada por temperaturas, verano diurno 2018.
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.7, Mapa 4.7

En el gráfico 4.7 se muestra que el rango de temperaturas más bajas, 7.28 - 15 °C, ocupa solamente el 0.91% del territorio de la ZMVT, mientras que el rango entre 29.01 y 35 °C ocupan el mayor porcentaje del territorio, con un 43.44%.

4.2.2 Verano diurno 2019



*Mapa 4.8 Identificación de la Isla de Calor diurna, verano 2019.
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.*

En los datos de temperatura superficial registrados la tarde del 31 de julio de 2019 que se muestran en el mapa 4.8, se identifica que el rango de temperatura más alto se encuentra en un rango de 26.01 – 36.75 °C, principalmente sobre los municipios de Toluca, Almoloya de Juárez, Lerma, Metepec, San Mateo Atenco, Chapultepec, la zona norte de Calimaya, Tenango del Valle y el sur de Otzolotepec y Xonacatlán. Por otra parte, el rango de temperatura superficial más baja se encuentra entre -4.29 y 6 °C, y se localiza principalmente en el norte de los municipios de Temoaya, Otzolotepec, Lerma, al sur de los municipios de Xonacatlán, Ocoyoacac, Xalatlaco, Tianguistenco, Almoloya de Juárez, Zinacantepec, Toluca y el oeste del municipio de Tenango del Valle.

Temperaturas °C	Hectáreas	%
-4.29 – 6	24547.56	9.06%
6.01 – 13	34554.40	12.75%
13.01 – 20	44378.42	16.38%
20.01 – 26	76812.61	28.35%
26.01 – 36.75	90644.90	33.46%

Tabla 4.8 Área ocupada por temperaturas, verano diurno 2019.

Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.8.

Área ocupada por temperaturas registradas

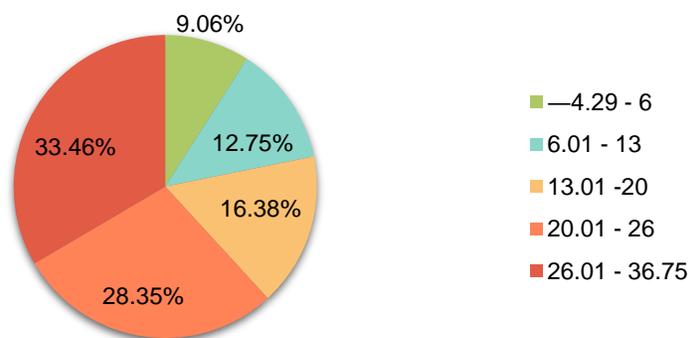
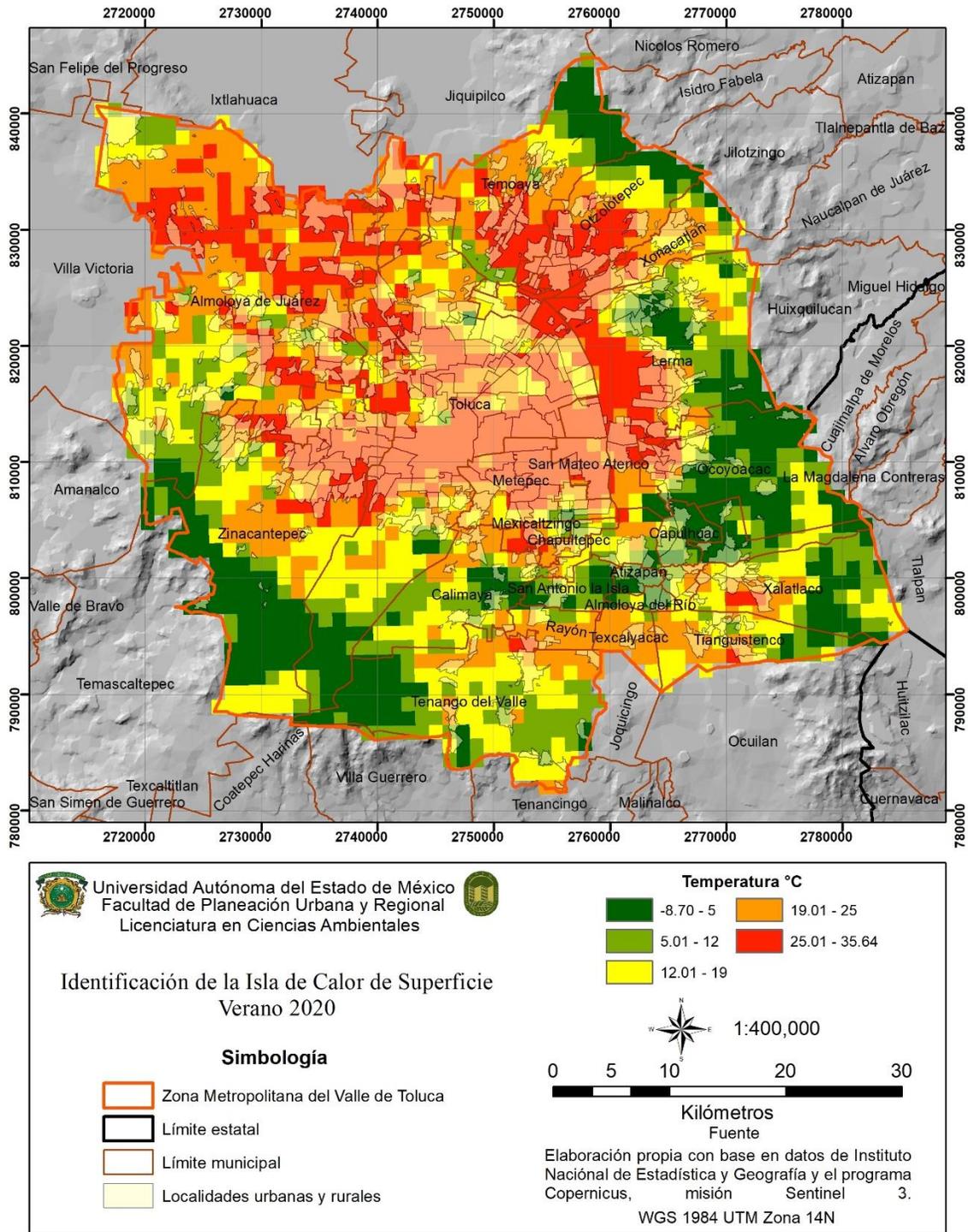


Gráfico 4.8 Área ocupada por temperaturas, verano diurno 2019.

Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.8, Mapa 4.8.

En el gráfico 4.8 se muestra que el rango de temperaturas que ocupa una mayor proporción de la ZMVT corresponde a 26.01 – 36.75 °C, con un 33.46% del total abarcado por el área de estudio, mientras que la temperatura correspondiente al rango de -4.29 – 6 °C abarca solamente el 9.06% del territorio.

4.2.3 Verano diurno 2020



Mapa 4.9 Identificación de la Isla de Calor diurna, verano 2020.
 Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

En el mapa 4.9 se muestran los datos de temperatura superficial registrados la tarde del 31 de julio de 2020, en este mapa se observa que el rango de temperatura más alta oscila entre 25.01 y 35.64 °C, cubriendo principalmente el centro-norte de la ZMVT, el norte de Zinacantepec, Metepec, San Mateo Atenco, además de la zona sur de Temoaya, Oztolotepec y Xonacatlán, así como la zona oeste de Lerma.

Mientras que la temperatura más baja registrada se encuentra en un rango de -8.70 a 5 °C, localizada en la zona norte de Temoaya y Oztolotepec, así como en los municipios de Lerma, Ocoyoacac, Capulhuac, Xalatlaco, San Antonio la Isla, Atizapán, Almoloya del Río y la zona sur de Almoloya de Juárez, Zinacantepec, Toluca y el oeste de Tenango del Valle.

Temperaturas °C	Hectáreas	%
-8.70 – 5	45343.34	16.70%
5.01 – 12	39311.59	14.48%
12.01 – 19	57783.33	21.29%
19.01 – 25	65121.16	23.99%
25.01 – 35.64	63896.29	23.54%

Tabla 4.9 Área ocupada por temperaturas, verano diurno 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.9.

Área ocupada por temperaturas registradas

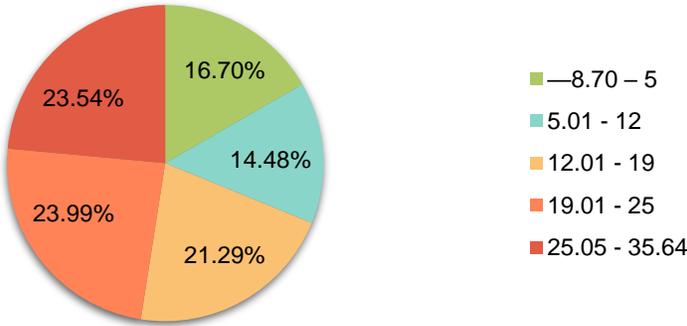
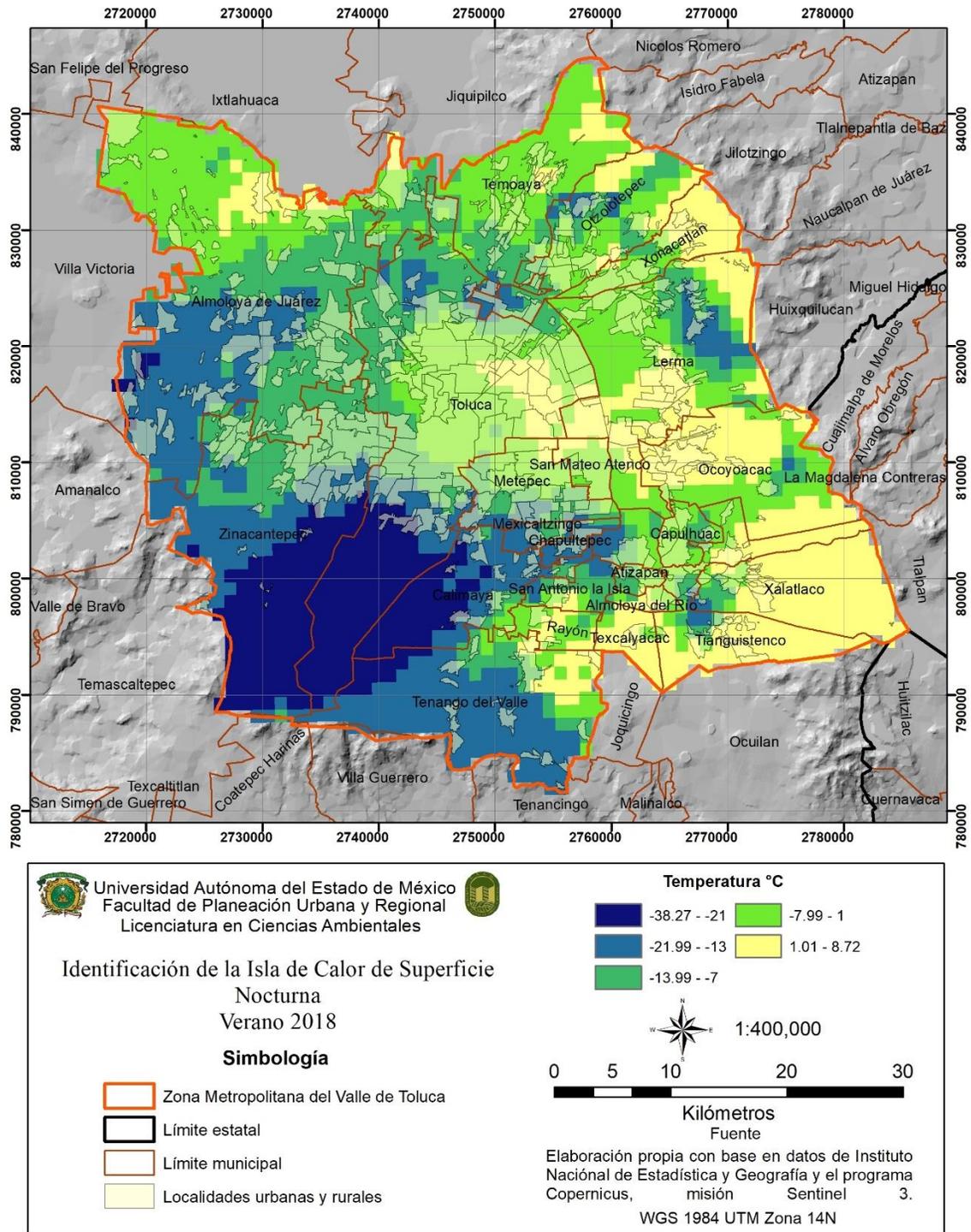


Gráfico 4.9 Área ocupada por temperaturas, verano diurno 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.9, Mapa 4.11.

De acuerdo con el gráfico 4.9, el rango de temperatura que ocupa un mayor porcentaje del área de estudio corresponde a 19.01 – 25 °C, con un 23.99% del total, mientras que el rango de temperatura con un menor porcentaje corresponde al rango de 5.01 – 12 °C, con un 14.48%.

4.2.4 Verano nocturno 2018



En cuanto a la isla de calor nocturna, se tomaron los datos registrados la noche del 30 de julio del 2018 que se observan en el mapa 4.10, donde se muestra que la temperatura superficial más elevada oscila entre 1.01 y 8.72 y se localiza en los municipios de Tianguistenco, Ocoyoacac, Xalatlaco, Texcaliacac, el norte de Lerma, Xonacatlán, Oztolotepec, Almoloya de Juárez, el este de Temoaya, Tenango del Valle y Toluca.

Mientras que las temperaturas superficiales en el rango de -38.27 a 21 °C se presentaron en la zona suroeste de la ZMVT, en los municipios de Zinacantepec, Toluca, Calimaya y Tenango del Valle.

Temperatura °C	Hectáreas	%
—38.27 - —21	28185.84	10.49%
—21.99 - —13	56066.33	20.87%
—13.99 - —7	58629.55	21.82%
—7.99 - 1	73514.77	27.37%
1.01 - 8.72	52239.76	19.45%

Tabla 4.10 Área ocupada por temperaturas, verano nocturno 2018.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.10

Área ocupada por temperaturas registradas

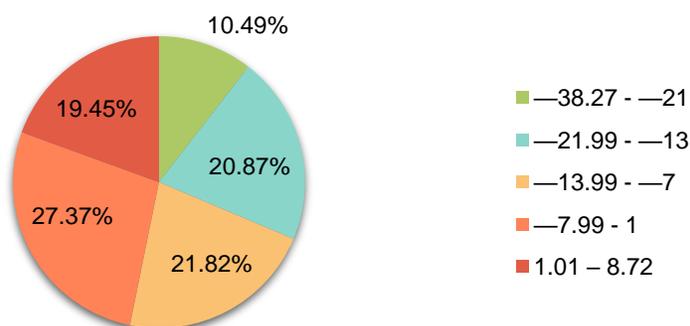
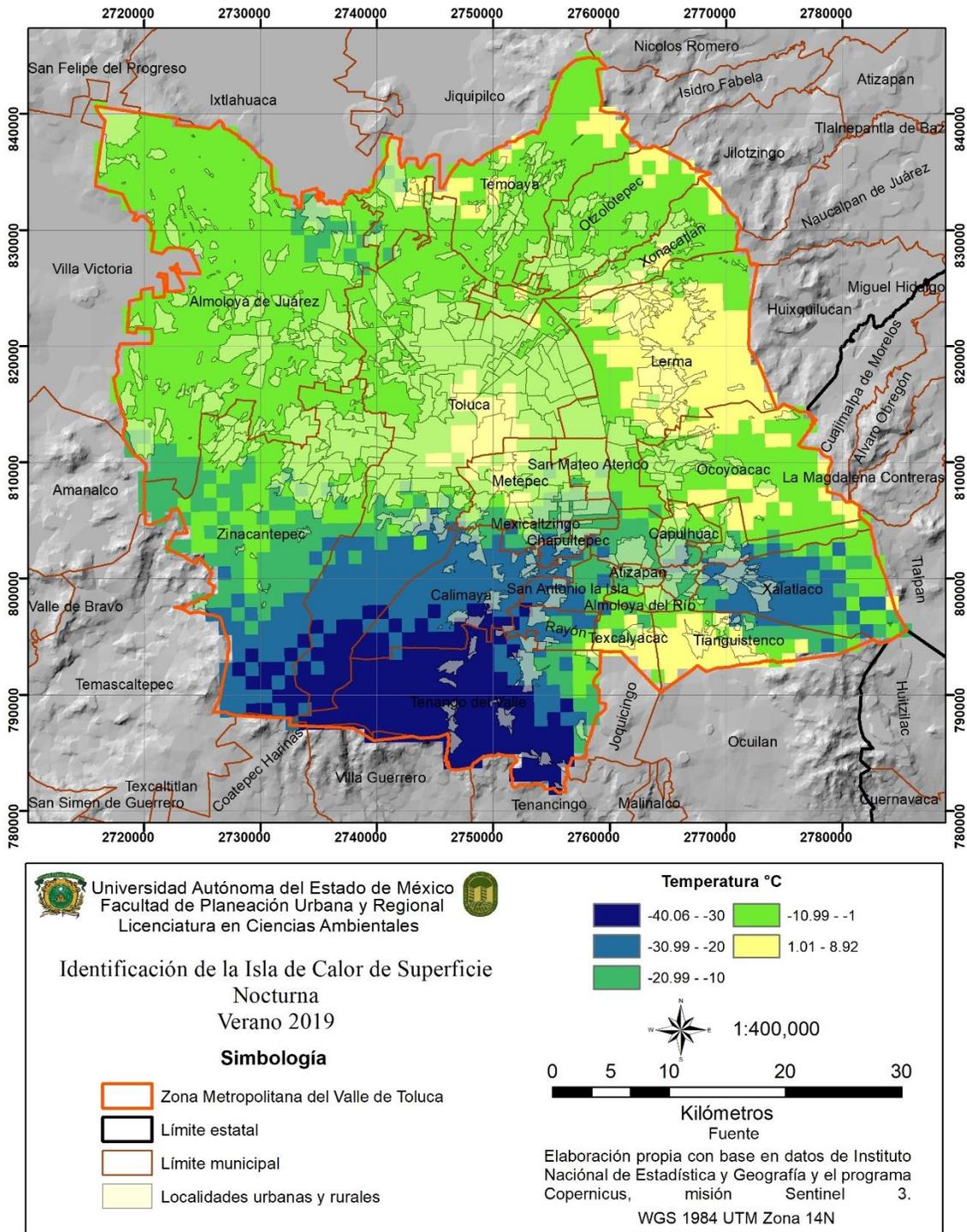


Gráfico 4.10 Área ocupada por temperaturas, verano nocturno 2018.
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.10, Mapa 4.10

De acuerdo con el Gráfico 4.10, el rango de temperatura ubicado entre los -7.99 a 1 °C es el que más porcentaje de área total ocupa, con un 27.37%, mientras que el rango de -38.27 a -21 °C es el que presenta una menor proporción, ocupando el 10.49% de la ZMVT.

4.2.5 Verano nocturno 2019



Mapa 4.11 Identificación de la Isla de Calor nocturna, verano 2019.
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

En cuanto a la isla de calor nocturna, se tomaron los datos de temperatura superficial registrados la noche del 30 de julio de 2019 que se observan en el mapa 4.11, donde se muestra que el rango de temperatura más elevada oscila entre 1.01 y 8.92 °C y se presenta en los municipios de Lerma, Ocoyoacac, Tianguistenco, Temoaya, Otzolotepec, Xonacatlán y la zona centro-este de Toluca.

Mientras que el rango de temperaturas superficiales de entre -40.06 y -30 °C se presenta en los municipios de Tenango del Valle y el sur de Toluca y Zinacantepec.

Temperatura °C	Hectáreas	%
—40.06 - —30	23956.51	8.87%
—30.99 - —20	33151.24	12.27%
—20.99 - —10	31950.94	11.83%
—10.99 - 1	148152.19	54.83%
1.01 – 8.92	32980.77	12.21%

Tabla 4.11 Área ocupada por temperaturas, verano nocturno 2019.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.11

Área ocupada por temperaturas registradas

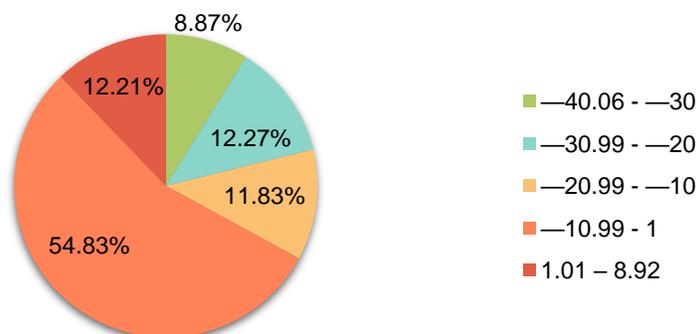
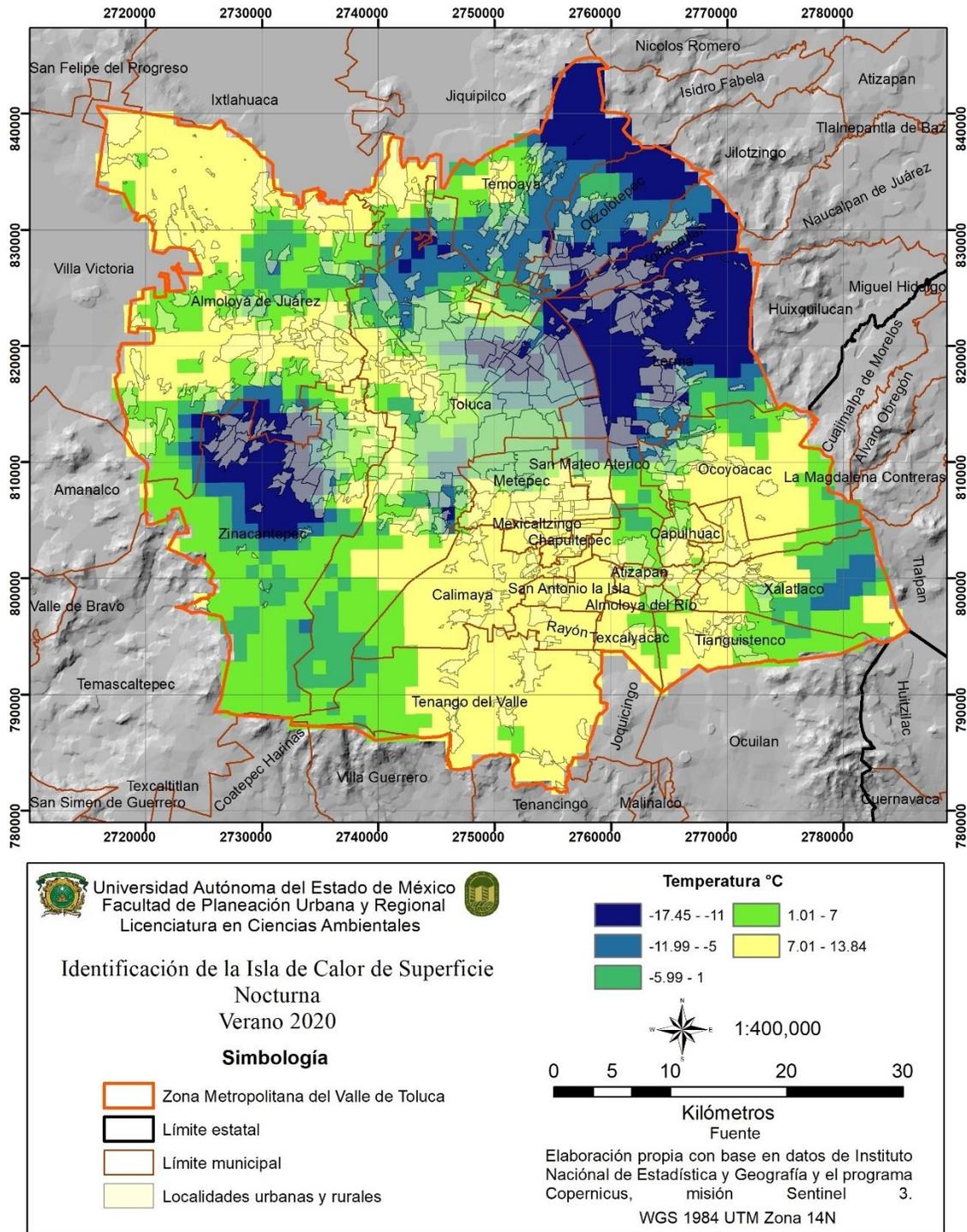


Gráfico 4.11 Área ocupada por temperaturas, verano nocturno 2019.
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.11, Mapa 4.11

De acuerdo con el gráfico 4.11, el rango de temperatura superficial que oscila entre -10.99 y 1 °C es el que ocupa un mayor porcentaje del total del área de estudio, con un 54.83%, mientras que solamente el 8.87% del territorio reporta temperaturas superficiales de entre -40.06 y -30 °C.

4.2.6 Verano nocturno 2020



Mapa 4.12 Identificación de la Isla de Calor nocturna, verano 2020.
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

Para el caso de la isla de calor nocturna, se tomaron los datos registrados la noche del 1 de agosto del 2020 correspondientes a la temperatura superficial que se muestra en el mapa 4.12 donde se observa que el rango de temperatura superficial más elevado se sitúa entre los 7.01 y 13.84 °C, este rango de temperatura se registró en los municipios de Almoloya de Juárez, Toluca, Temoaya, Metepec, Mexicaltzingo, Chapultepec, Calimaya, San Antonio la Isla, Rayón, Texcaliacac, Tenango del Valle, Tianguistenco, Xalatlaco, Capulhuac y Ocoyoacac.

Mientras que el rango de temperatura más baja, que oscila entre los -17.45 y -11 °C se registró en la zona norte de Temoaya, Oztolotepec, Toluca, Zinacantepec, así como en los municipios de Xonacatlán y Lerma.

Temperatura °C	Hectáreas	%
—17.45 - —11	43283.94	16.04%
—11.99 - —5	29655.81	10.99%
—5.99 - 1	38922.85	14.43%
1.01 - 7	59262.79	21.96%
7.01 - 13.84	98683.28	36.58%

Tabla 4.12 Área ocupada por temperaturas, verano nocturno 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.12

Área ocupada por temperaturas registradas

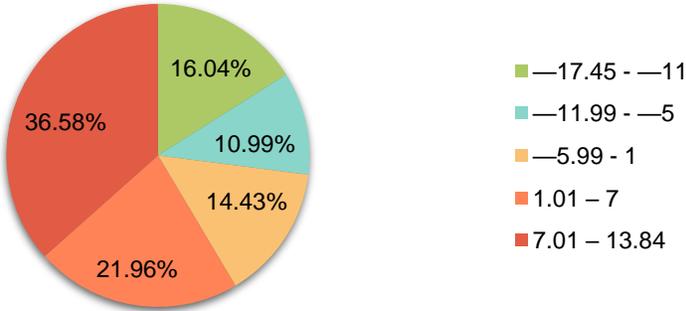


Gráfico 4.12 Área ocupada por temperaturas, verano nocturno 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.12, Mapa 4.12

En el Gráfico 4.12 puede observarse que el rango de temperatura superficial que predomina en la ZMVT para esta fecha corresponde al rango situado entre 7.01 y 13.84 °C, ocupando 36.58 % de la superficie total; mientras que en el 10.99% del territorio se registraron temperaturas de entre -11.99 y -5 °C.

4.2.7 Análisis de temperatura superficial verano diurno 2018 – 2020

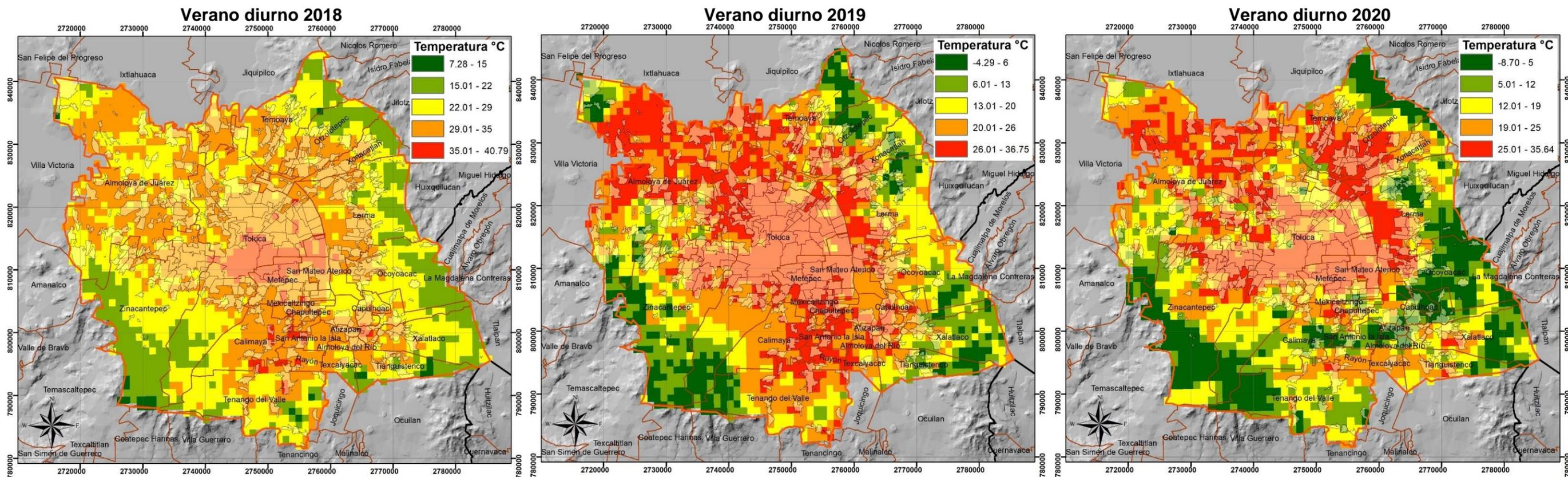


Imagen 4.4 Análisis de temperatura superficial correspondiente a la temporada de verano diurno de los años 2018- 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3 e INEGI 2020.

Los datos de temperatura superficial para el verano de los años 2020, 2019 y 2018 muestra que el año más cálido fue el 2018, con una temperatura superficial máxima de 40.79 °C, y se presenta solamente en un 4.46% del territorio, principalmente en la zona centro del municipio de Toluca. Por otra parte, el verano de 2019 presenta una mayor cobertura del territorio en cuanto al rango de temperatura superficial más elevada (26.01 – 36.75 °C) con un porcentaje equivalente al 33.46% de la superficie total de la ZMVT.

En la imagen 4.4 se puede observar la comparación de la distribución espacial de la temperatura superficial varía de un año a otro, pues para el año 2018 la amplitud de la distribución de las temperaturas más elevadas es mínima, mientras que, en los años siguientes, las temperaturas más elevadas amplían su distribución principalmente al norte de la ZMVT.

Del mismo modo, puede observarse que las temperaturas superficiales más bajas ocupan un área mínima en el verano de 2018 (0.91% del territorio), mientras que estas áreas más frescas se incrementan en los años siguientes, siendo el año 2020 en el que se presenta una mayor cobertura del rango de temperatura superficial más baja (-8.70 a 5 °C). Para los tres años se observa que las temperaturas más elevadas se presentan principalmente en el territorio ocupado por asentamientos humanos, mientras que las más bajas se presentan en áreas boscosas o con mayor cobertura vegetal de la ZMVT.

4.2.8 Análisis de temperatura superficial verano nocturno 2018 – 2020

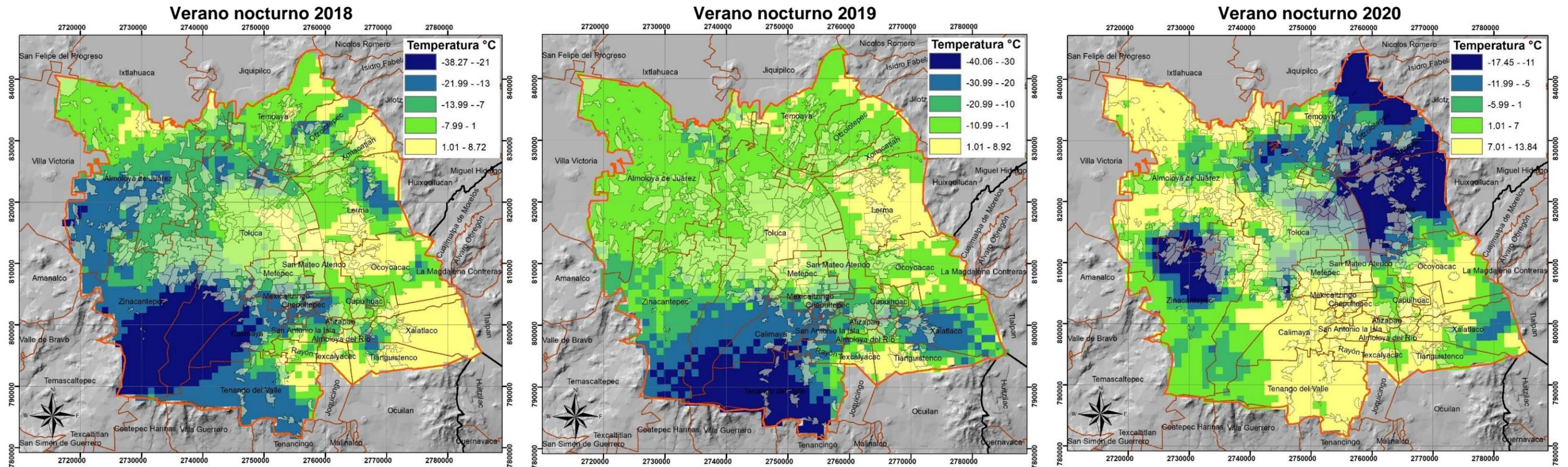


Imagen 4.5 Análisis de temperatura superficial correspondiente a la temporada de verano nocturno de los años 2018- 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3 e INEGI 2020.

Los registros de temperatura correspondientes al análisis nocturno que se presentan en la imagen 4.5 muestran que las temperaturas más elevadas se registran en un rango máximo de entre 7 y 13.84 °C y mínimo de 8.92 y 8.72 para los años 2020, 2019 y 2018 respectivamente.

Estas temperaturas más elevadas se registran generalmente en las zonas donde se encuentran los asentamientos humanos y en algunos casos en la periferia de la ZMVT. Mientras que las temperaturas más bajas se presentan en hasta -38.27, -40.06 y -17.45 para los años 2018, 2019 y 2020 respectivamente, y en este caso su distribución geográfica corresponde a zonas de la periferia e intermedias.

De los tres años, en 2020 es donde se pueden observar los límites más marcados de diferencia de temperatura entre cada rango, y su distribución espacial concuerda con la distribución que se obtuvo en los resultados diurnos.

4.2.9 Correlación vegetación y espacios urbanos vs temperatura verano diurno 2018 – 2020.

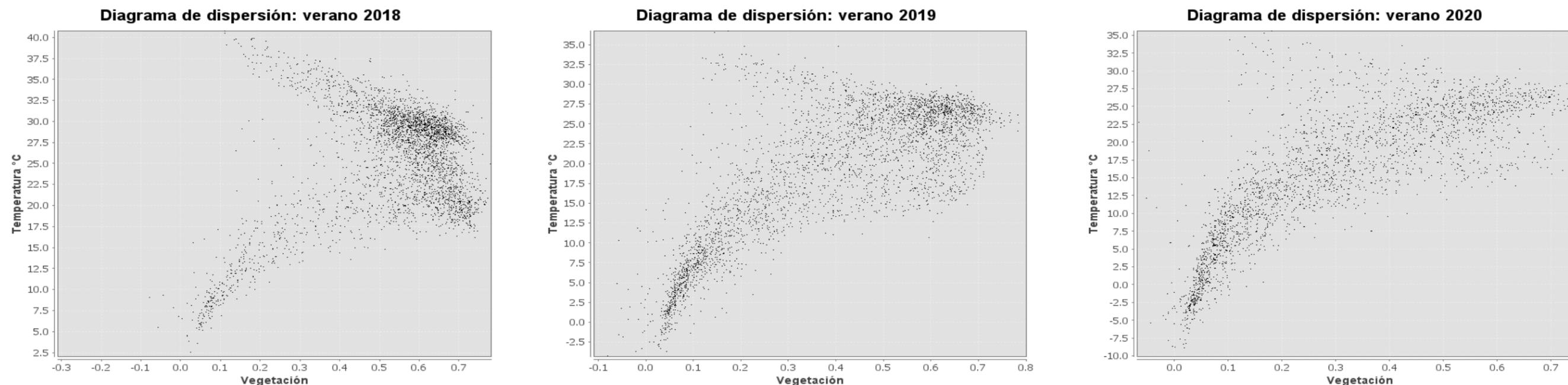


Imagen 4.6 Correlación vegetación / temperatura verano diurno 2018 – 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3.

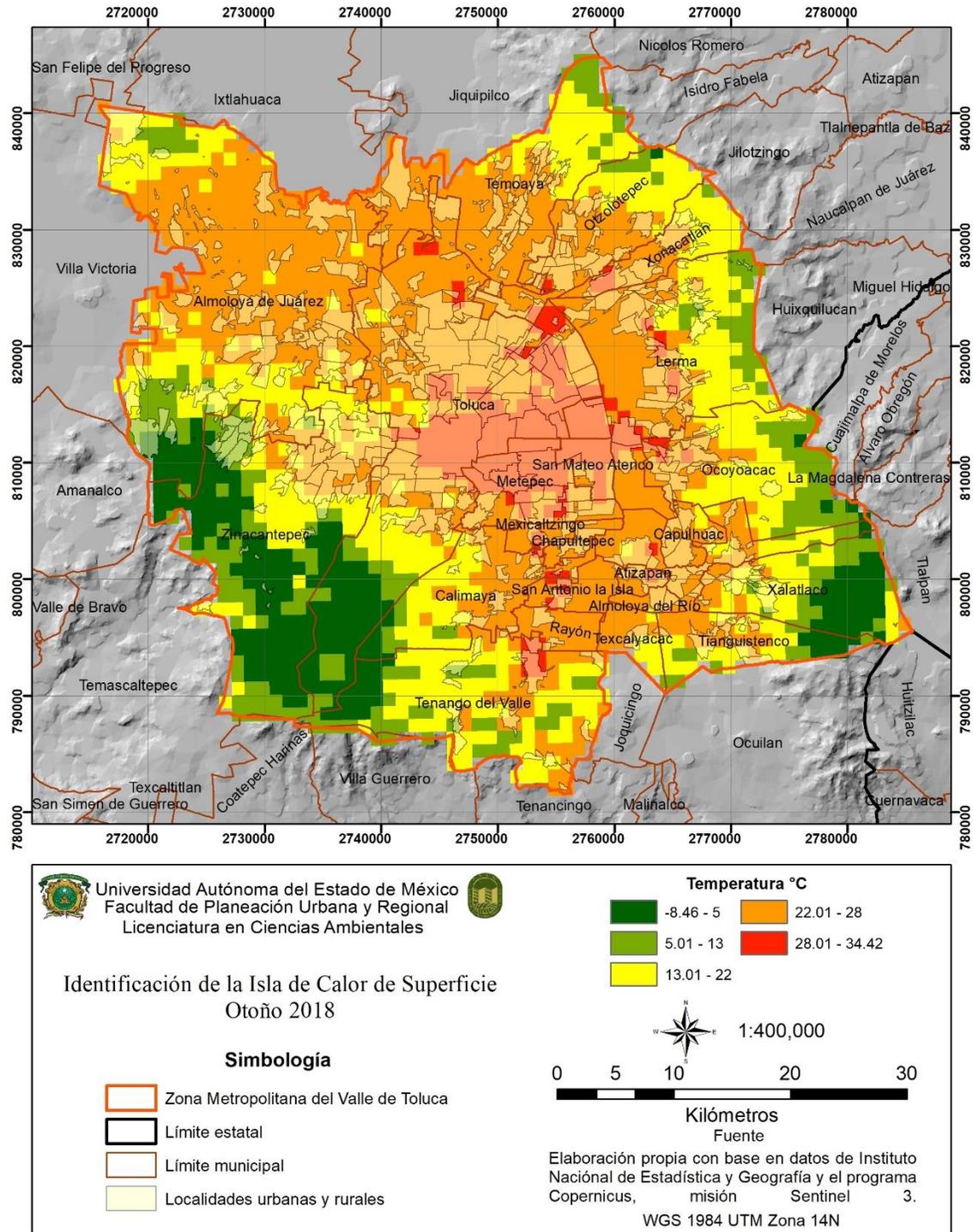
Los datos que se muestran en la Imagen 4.6 corresponden a la información obtenida de las bandas de información de verano de 2018, 2019 y 2020 utilizados para realizar el análisis diurno de temperatura superficial, y a diferencia de la época de primavera donde se mostraba una mayor porción del territorio dominada por temperaturas elevadas, para el caso de Verano el patrón de distribución cambia, mostrando en las gráficas de dispersión esta situación.

Para el caso del Verano de 2018, se aprecia en el primer diagrama que la mayor concentración de temperatura se encuentra en zonas donde la vegetación comienza a ser abundante, pero se mantiene en temperaturas superficiales de hasta 32.5 °C, mientras que las zonas con temperaturas más elevadas se mantienen en zonas donde las imágenes sugieren una ausencia de vegetación y/o presencia de asentamientos humanos, dentro de esta escala también se observa que existen algunas zonas donde la temperatura llega a alcanzar los 7.5 °C y que pueden ser asociadas a zonas donde existen pequeños parques y áreas vegetadas dentro de los asentamientos humanos.

La situación se repite para el caso de 2019 y 2020, pues en los mapas se observa un aumento de la superficie donde se presentan temperaturas elevadas, sin embargo, se muestran pequeños parches en esta zona donde la temperatura es más baja, y a diferencia del Verano de 2018, en los dos años siguientes las temperaturas más elevadas incrementaron su distribución a zonas donde la cobertura vegetal comienza a ser más abundante en comparación con la presencia de asentamientos humanos.

4.3 Temperatura superficial otoño

4.3.1 Otoño diurno 2018



Mapa 4.13 Identificación de la Isla de Calor diurna, otoño 2018.
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

El mapa 4.13 muestra la representación de la distribución espacial de las temperaturas superficiales registradas la tarde del 30 de octubre de 2018, en donde se puede observar que el rango de temperaturas más altas se encuentra entre 28.01 y 34.42 °C, localizadas en la zona centro-norte del municipio de Toluca, San Mateo Atenco, Tenango del Valle, Ocoyoacac, Tianguistenco, así como la zona sureste y el centro del municipio de Lerma y el centro de San Antonio la Isla y Mexicaltzingo. Mientras que las temperaturas más bajas se encuentran en la zona sur de los municipios de Almoloya de Juárez, Zinacantepec, Toluca, Calimaya, el oeste de Tenango del Valle y la zona este de los municipios de Tianguistenco, Xalatlaco, Ocoyoacac y Oztolotepec, con temperaturas superficiales que oscilan entre los -8.46 y 5 °C.

Temperaturas °C	Hectáreas	%
-8.46 – 5	26014.96	9.60%
5.01 – 13	31549.87	11.64%
13.01 – 22	68750.35	25.36%
22.01 – 28	124407.49	45.90%
28.01 – 34.42	20328.62	7.50%

Tabla 4.13 Área ocupada por temperaturas, otoño diurno 2018.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.13

Área ocupada por temperaturas registradas

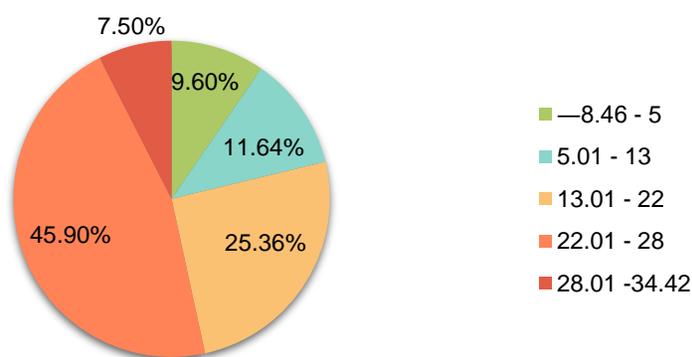
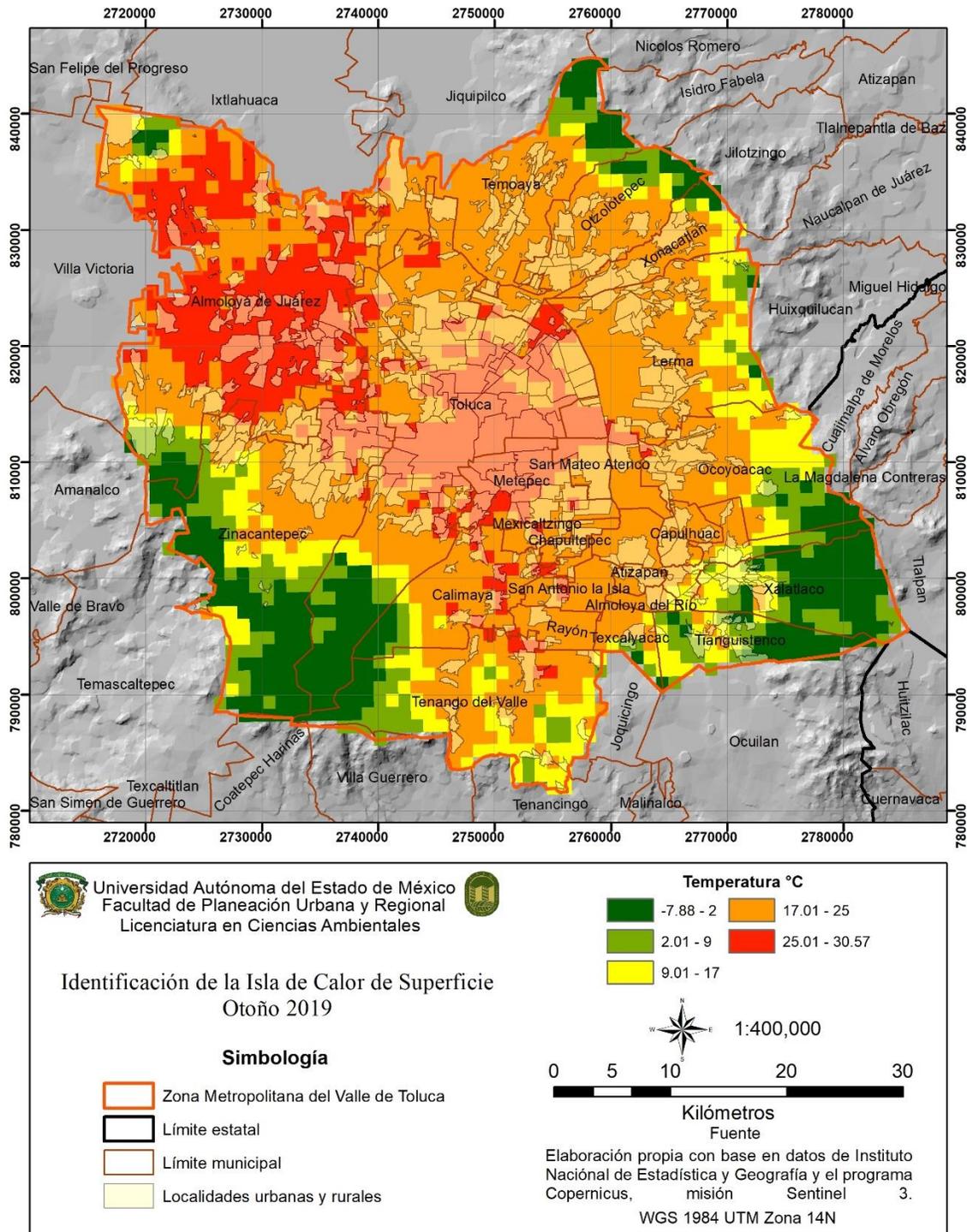


Gráfico 4.13 Área ocupada por temperaturas, otoño diurno 2018.
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.13, Mapa 4.13

En el gráfico 4.13 se muestra que el rango de temperaturas ubicado entre 28.01 y 34.42 °C ocupa un porcentaje bajo del total del territorio de la ZMVT, con un 7.50%; mientras que el rango de 22.01 y 28 °C ocupa un porcentaje del 45.90%.

4.3.2 Otoño diurno 2019



Mapa 4.14 Identificación de la Isla de Calor diurna, otoño 2019.
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

En el mapa 4.14 se presentan los datos de temperatura superficial registrados la tarde del 28 de octubre de 2019, donde se muestra que la temperatura más alta se registró en un rango de 25.01 a 33.16 °C, y se localiza principalmente sobre los municipios de Almoloya de Juárez, la zona centro-norte de Toluca, así como en Metepec, San Mateo Atenco y la zona norte de Calimaya y Tenango del Valle. La temperatura más baja registrada se localiza en la zona noroeste de Almoloya de Juárez, el norte de Temoaya, Oztolotepec y Xonacatlán, el este de Ocoyoacac, Xalatlaco y Tianguistenco, el oeste de Tenango del Valle y la zona sur de los municipios de Zinacantepec, Almoloya de Juárez y Toluca.

Temperaturas °C	Hectáreas	%
-7.88 – 2	33647.30	12.45%
2.01 – 9	22156.55	8.20%
9.01 – 17	27254.29	10.08%
17.01 – 25	132787.86	49.12%
25.01 – 30.57	54507.05	20.16%

Tabla 4.14 Área ocupada por temperaturas, otoño diurno 2019.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.14.

Área ocupada por temperaturas registradas

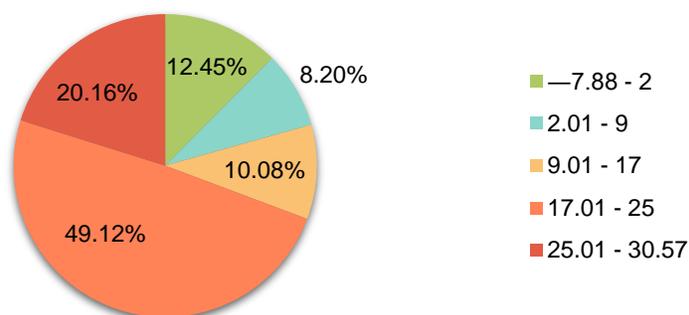
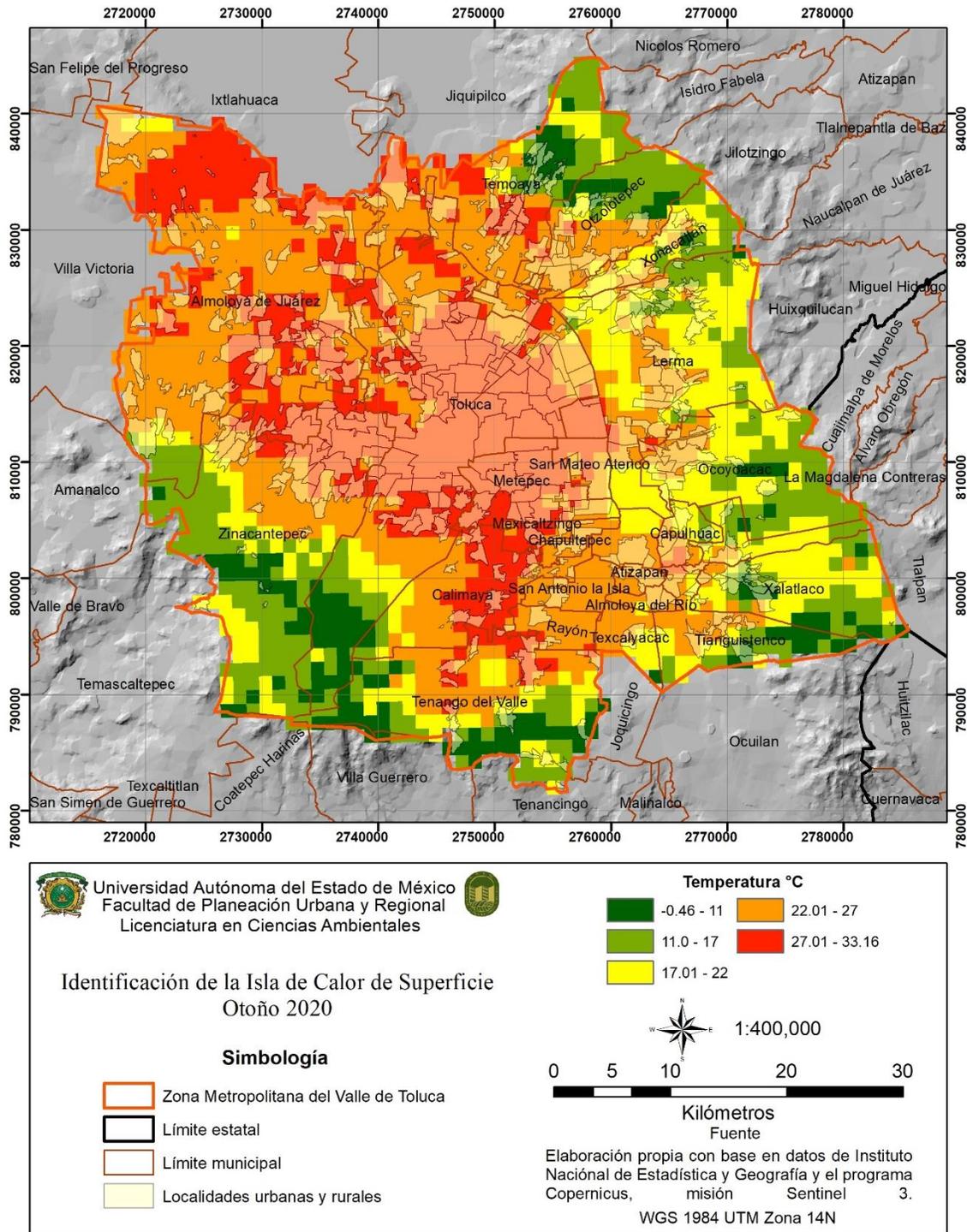


Gráfico 4.14 Área ocupada por temperaturas, otoño diurno 2019
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.14, Mapa 4.14

De acuerdo con la tabla y gráfico 4.14, el mayor porcentaje de ocupación territorial corresponde al rango de temperaturas de entre 17.01 a 25 °C con un 49.12%, mientras que el rango con menor ocupación corresponde a las temperaturas de entre 2.01 a 9 °C, ocupando un 8.20% del total del territorio de la ZMVT.

4.3.3 Otoño diurno 2020



Mapa 4.15 Identificación de la Isla de Calor diurna, otoño 2020.
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

Para la tarde del día 29 de octubre del año 2020, se obtuvieron los registros de temperatura superficial que se muestran en el mapa 4.15, donde se identifica que el rango de temperatura superficial más elevado se encuentra entre 27.01 y 33.16 °C, localizado principalmente en los municipios de Toluca, Almoloya de Juárez, Temoaya, Metepec, Zinacantepec, San Mateo Atenco, Mexicaltzingo, Calimaya y el norte de Tenango del Valle.

Mientras que la temperatura superficial más baja se registra entre -0.46 y 11 °C y se localiza en la zona centro de los municipios de Zinacantepec y Ocoyoacac, el sur de Toluca, Tenango del Valle, Tianguistenco y la zona centro-norte de Temoaya y Otzolotepec.

Temperaturas °C	Hectáreas	%
-0.46 – 11	18631.67	6.85%
11.01 – 17	43716.32	16.08%
17.01 – 22	45750.52	16.83%
22.01 – 27	95806.28	35.24%
27.01 – 33.16	67943.69	24.99%

Tabla 4.15 Área ocupada por temperaturas, otoño diurno 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.15.

Área ocupada por temperaturas registradas

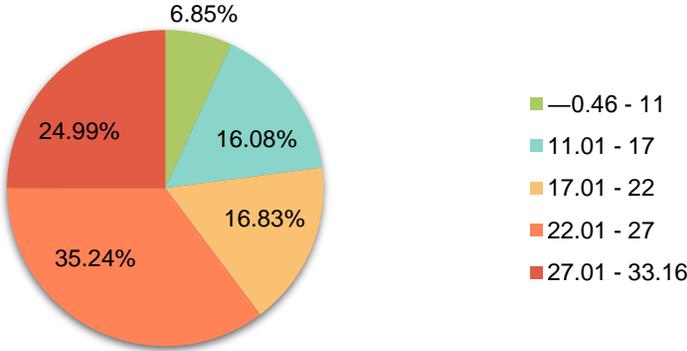
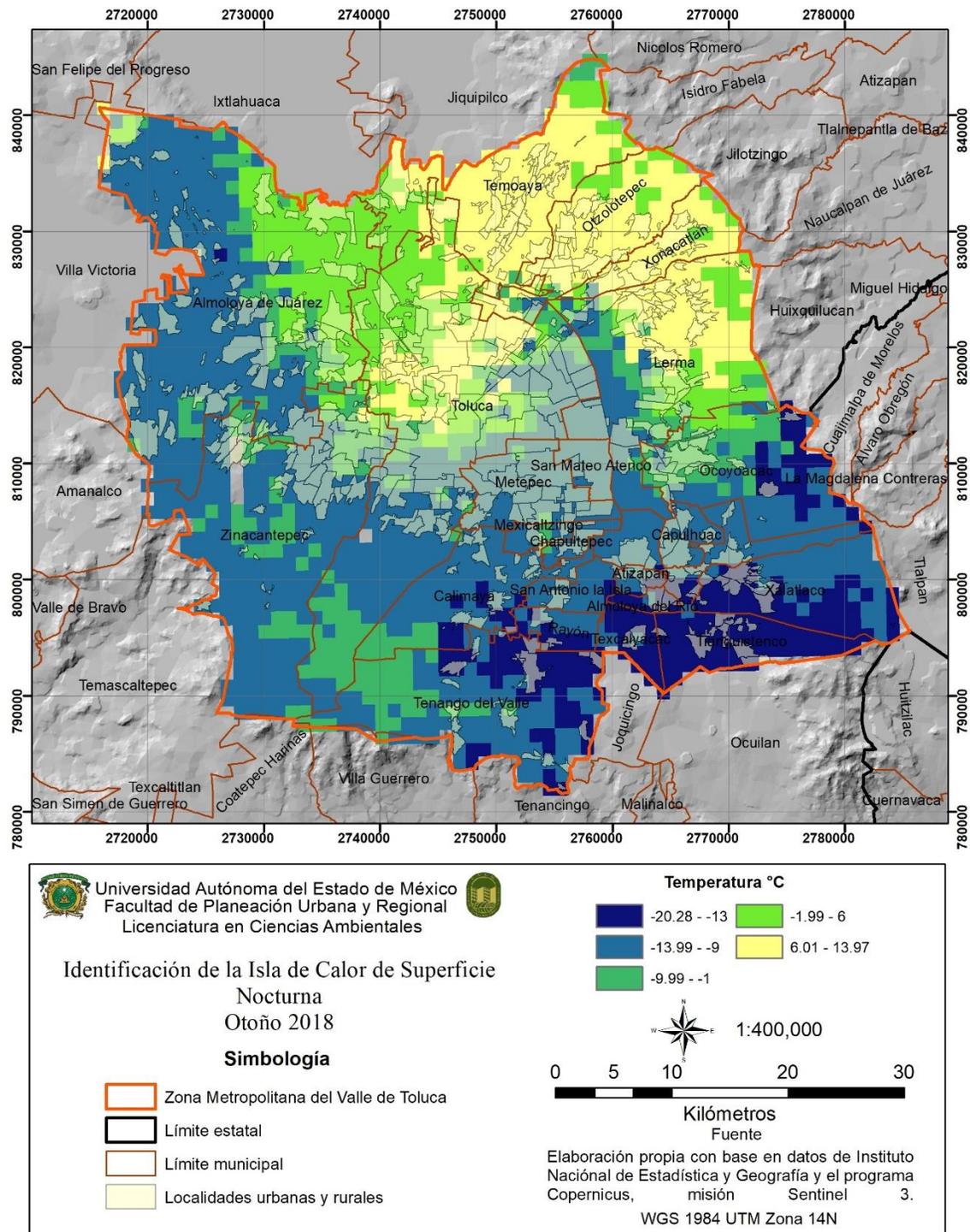


Gráfico 4.15 Área ocupada por temperaturas, otoño diurno 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.15, Mapa 4.15

De acuerdo con el gráfico y la tabla 4.15, el rango de temperaturas que presenta un mayor porcentaje de ocupación del área total del territorio de la ZMVT corresponde al ubicado entre los 22.01 y 27 °C, con un porcentaje del 35.24%. Mientras que el más bajo (6.85%) es ocupado por temperaturas entre -0.46 a 11 °C.

4.3.4 Otoño nocturno 2018



Mapa 4.16 Identificación de la Isla de Calor nocturna, otoño 2018.
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

Por otra parte, se obtuvieron los registros de temperatura superficial correspondientes a la noche del 30 de octubre de 2018 que se muestran en el mapa 4.16, donde se observa que el rango de temperatura más elevada se encuentra entre 6.01 y 13.97 °C, distribuido en la zona norte de la ZMVT, en los municipios de Toluca, Temoaya, Otzolotepec, Xonacatlán y el norte de Lerma. Mientras que las temperaturas más bajas oscilan entre -20.28 y -13 °C, y se registran en el sureste de la zona de estudio, en los municipios de Tianguistenco, Ocoyoacac, Rayón, Texcaliacac, Almoloya del Río, Tenango del Valle y Calimaya.

Temperatura °C	Hectáreas	%
—20.28 - —13	28676.23	10.67%
—13.99 - —9	126691.83	47.15%
—9.99 - —1	33271.46	12.38%
1.01 – 6	35506.95	13.21%
6.01 – 13.97	44540.80	16.58%

Tabla 4.16 Área ocupada por temperaturas, otoño nocturno 2018.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.16

Área ocupada por temperaturas registradas

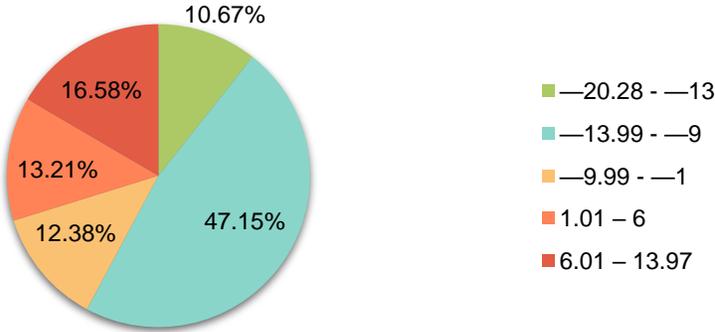
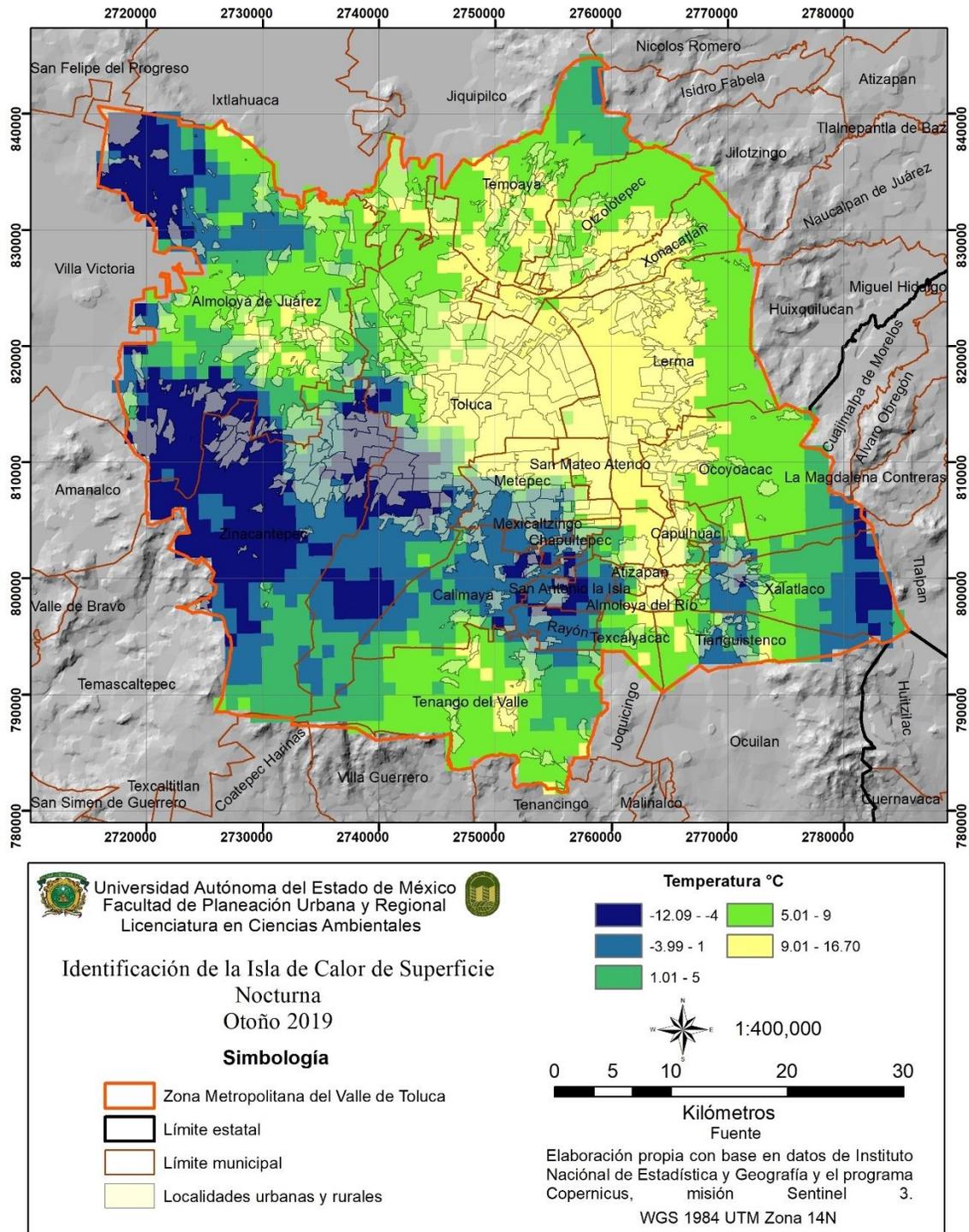


Gráfico 4.16 Área ocupada por temperaturas, otoño nocturno 2018.
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.16, Mapa 4.16

De acuerdo con el Gráfico 4.16, el rango de temperatura que predomina en la ZMVT corresponde al rango de -13.99 a -9 °C con un 47.15% del total del área de estudio, mientras que el rango de temperatura superficial que oscila entre -20.28 y -13 °C es el que menos se presenta, ocupando un 10.67% del área.

4.3.5 Otoño nocturno 2019



Mapa 4.17 Identificación de la Isla de Calor nocturna, otoño 2019.
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

Por otra parte, la información de temperatura superficial registrada la noche del 28 de octubre del año 2019 se muestran en el mapa 4.17, donde se observa que el rango de temperatura superficial más elevado que oscila entre 9.01 y 16.70 °C se distribuye principalmente en el centro y noreste de la ZMVT, en los municipios de Toluca, Temoaya, Otzolotepec, Xonacatlán, Lerma, Ocoyoacac, San Mateo Atenco, Metepec, Tianguistenco, Almoloya del Río, Capulhuac y Atizapán.

Mientras que las temperaturas superficiales registradas entre los -12.09 y -4 °C se distribuyen en la zona noroeste y suroeste del municipio de Almoloya de Juárez, así como en la zona oeste de los municipios de Zinacantepec, Toluca y el este de Xalatlaco, Calimaya y el centro de San Antonio la Isla.

Temperatura °C	Hectáreas	%
-12.09 - -4	38421.43	14.25%
-4.99 - 1	46455.14	17.23%
1.01 - 5	41320.50	15.32%
5.01 - 9	83349.52	30.91%
9.01 - 16.70	60148.31	22.30%

Tabla 4.17 Área ocupada por temperaturas, otoño nocturno 2019.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.17

Área ocupada por temperaturas registradas

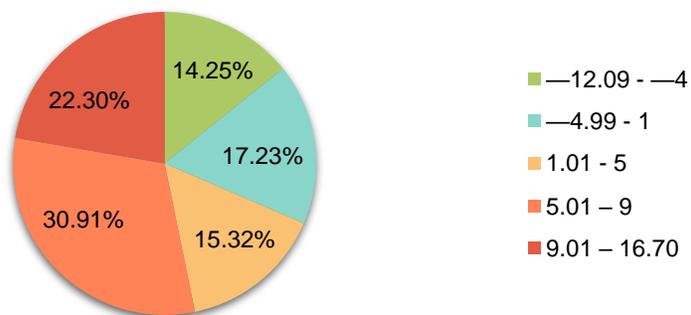
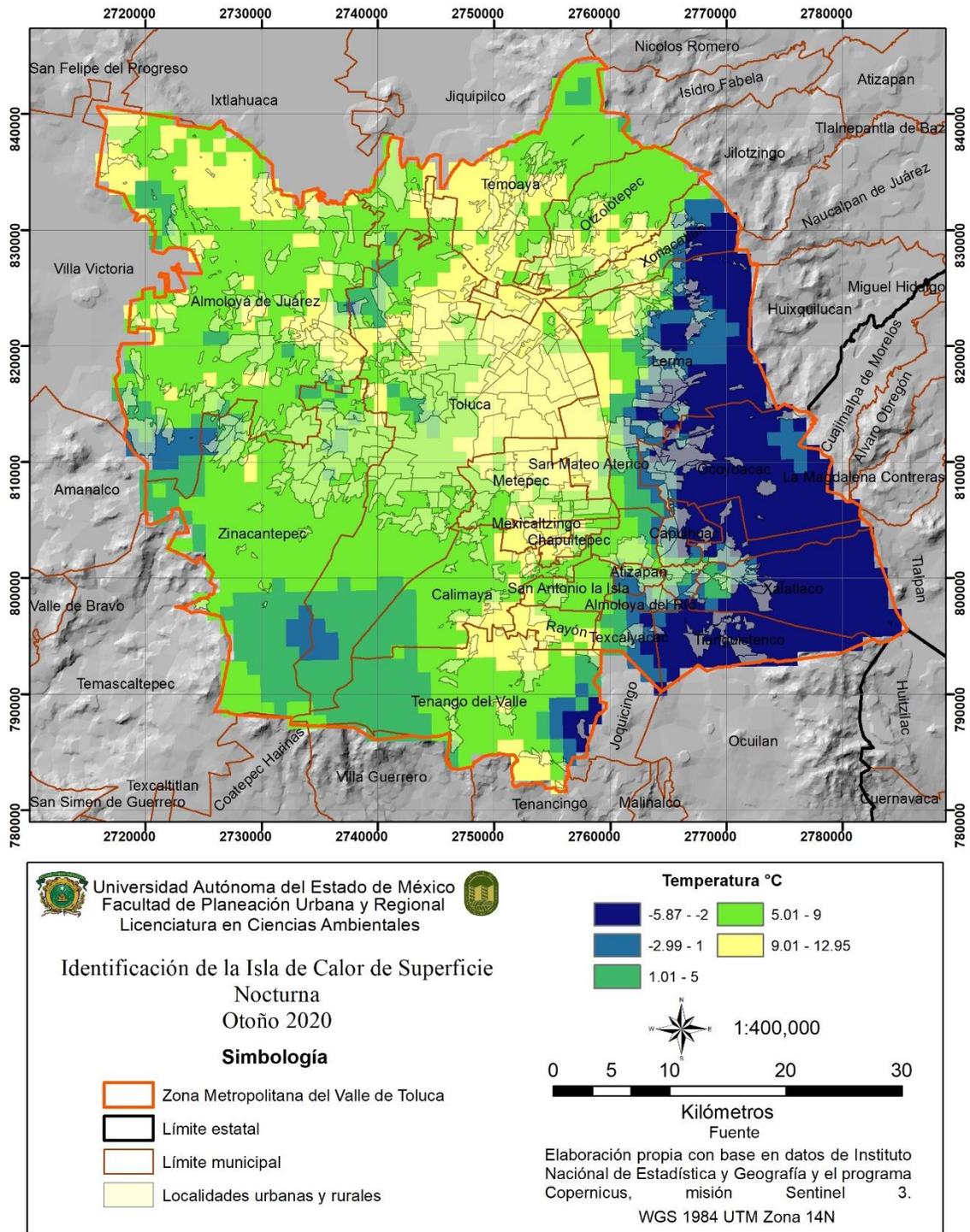


Gráfico 4.17 Área ocupada por temperaturas, otoño nocturno 2019.
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.17, Mapa 4.17

De acuerdo con el Gráfico 4.17, el rango de temperatura que presenta un mayor porcentaje de área corresponde al rango situado entre 5.01 y 9 °C con 30.91% del total del territorio metropolitano; mientras que el rango de temperatura superficial situado entre -12.09 y -4 °C tiene un porcentaje de ocupación del 14.25%.

4.3.6 Otoño nocturno 2020



Mapa 4.18 Identificación de la Isla de Calor nocturna, otoño 2020.
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

En cuanto a la isla de calor nocturna, se tomaron los registros de temperatura superficial de la noche del 31 de octubre de 2020 que se muestran en el mapa 4.18; en este mapa se muestra que el rango de temperatura superficial más elevado oscila entre 9.01 y 12.95 °C y se registró en los municipios centrales de la ZMVT como Temoaya, Toluca, Oztolotepec, Xonacatlán, San Mateo Atenco, Metepec, Mexicaltzingo, Chapultepec, Calimaya, Tenango del Valle, Rayón, así como la zona noroeste y este del municipio de Almoloya de Juárez.

Mientras que las temperaturas más bajas se encuentran en un rango de entre -5.87 y -2 °C, distribuidas en la zona este de la ZMVT, en los municipios de Xonacatlán, Lerma, Ocoyoacac, Capulhuac, Xalatlaco y Tianguistenco.

Temperatura °C	Hectáreas	%
—5.87 - —2	42400.57	15.71%
—2.99 - 1	16863.45	6.25%
1.01 - 5	34238.61	12.68%
5.01 – 9	122032.97	45.20%
9.01 – 12.95	54421.92	20.16%

Tabla 4.18 Área ocupada por temperaturas, otoño nocturno 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.18

Área ocupada por temperaturas registradas

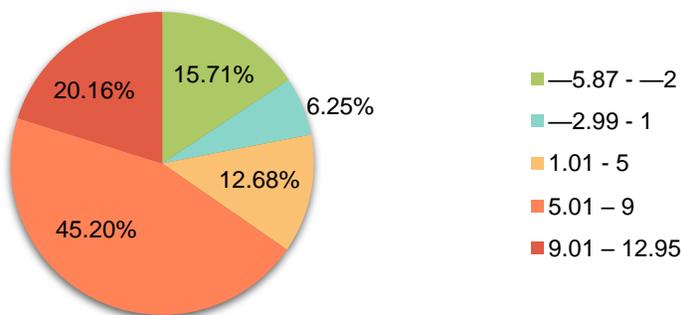


Gráfico 4.18 Área ocupada por temperaturas, otoño nocturno 2020
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.18, Mapa 4.18

De acuerdo con el Gráfico 4.18, el rango de temperatura que se encuentra entre 5.01 y 9 °C es el que predomina en la ZMVT, con un porcentaje de área equivalente al 45.20%, mientras que el 6.25% del área de estudio reportó temperaturas que oscilan entre -2.99 y 1 °C.

4.3.7 Análisis de temperatura superficial otoño diurno 2018 – 2020

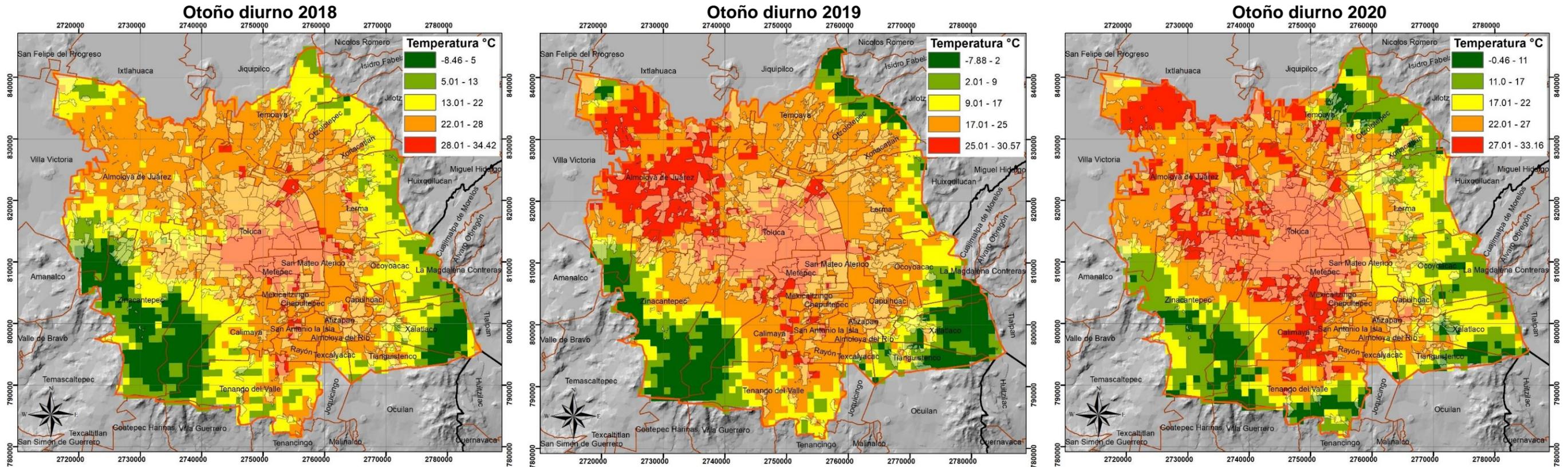


Imagen 4.7 Análisis de temperatura superficial correspondiente a la temporada de otoño diurno de los años 2018- 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3 e INEGI 2020.

La distribución de la temperatura superficial para el otoño de los años 2020, 2019 y 2018 se presenta de manera similar a los datos recabados para el verano de los tres años, pues el año en que se presenta la temperatura superficial más elevada (34.42 °C) es el 2018, y se presenta en la zona centro del municipio de Toluca, pero a diferencia del verano de 2018, el rango que contiene a la temperatura superficial más elevada también se presenta sobre los municipios de Metepec, San Mateo Atenco y Lerma principalmente.

En cuanto a distribución espacial de las temperaturas superficiales, para los años 2019 y 2020, se puede observar en la imagen 4.7 que el porcentaje de ocupación de temperaturas superficiales incrementa en un porcentaje menor respecto de estos y el año 2018, siendo el año 2020 en el que se presenta una mayor cobertura del rango de temperaturas más elevadas (27.01 y 33.16 °C), abarcando un 24.99% del territorio de la ZMTV. Por otra parte, la temperatura superficial más baja registrada se encuentra en un rango de -8.46 y 5 °C en el año 2018 y abarca solo un 9.60% del territorio nacional, sin embargo, en el año 2020 el rango de temperatura superficial más baja (-0.46 – 11) tiene el porcentaje de ocupación más bajo de los tres años, con un porcentaje del 6.85%.

En resumen, se puede observar que las temperaturas superficiales más elevadas se localizan generalmente sobre las áreas del territorio cuyo uso de suelo está dominado por asentamientos humanos y se muestra un decrecimiento de la temperatura conforme el territorio muestra una menor cobertura de superficies artificiales como lo son el pavimento, los edificios y las zonas habitacionales.

4.3.8 Análisis de temperatura superficial otoño nocturno 2018 – 2020

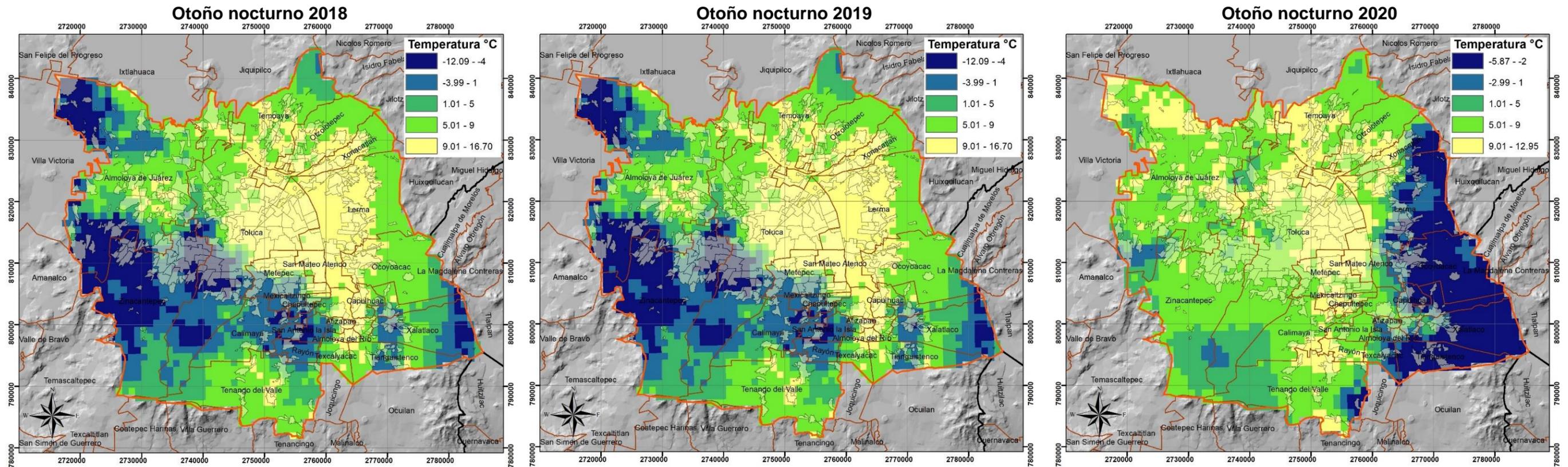


Imagen 4.8 Análisis de temperatura superficial correspondiente a la temporada de otoño nocturno de los años 2018- 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3 e INEGI 2020.

Para el caso de la isla de calor nocturna, en la imagen 4.8 se comparan los resultados obtenidos para los tres años analizados, y se puede observar que la distribución espacial de las temperaturas se encuentra acorde con los resultados diurnos, pues las temperaturas superficiales más elevadas se registran en las zonas con asentamientos humanos, mientras que las temperaturas más bajas se registraron en la periferia.

En este caso las temperaturas más altas se encuentran entre 13.97, 16.70 y 12.95 para los años 2018, 2019 y 2020 respectivamente, mientras que las más bajas se registraron en -20.28, -12.09 y -5.87 para los mismos años, siendo el año 2020 en el que se presentaron las temperaturas más bajas y 2019 las más altas.

4.3.9 Correlación vegetación y espacios urbanos vs temperatura otoño diurno 2018 – 2020.

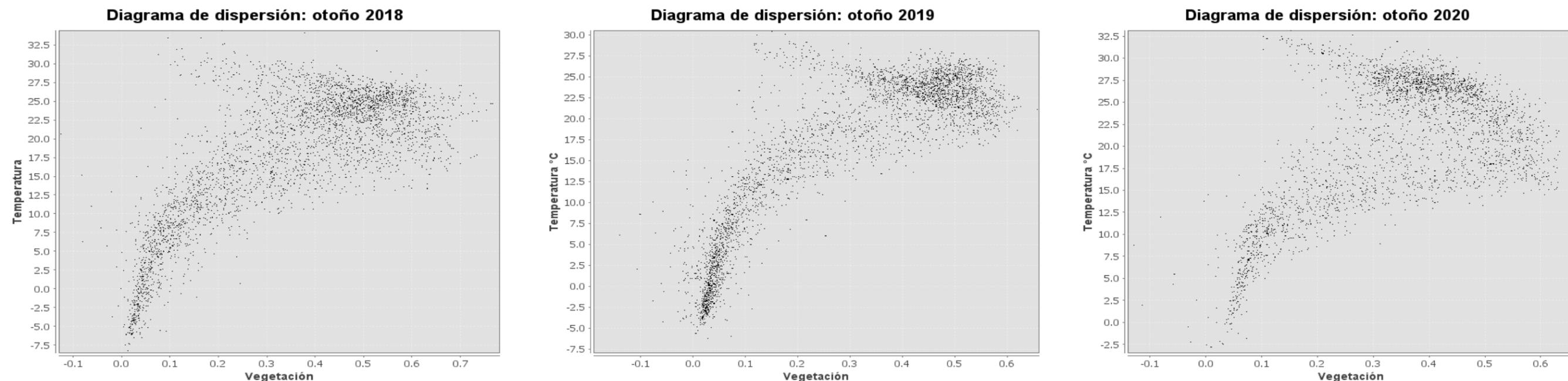


Imagen 4.9 Correlación vegetación / temperatura otoño diurno 2018 – 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3.

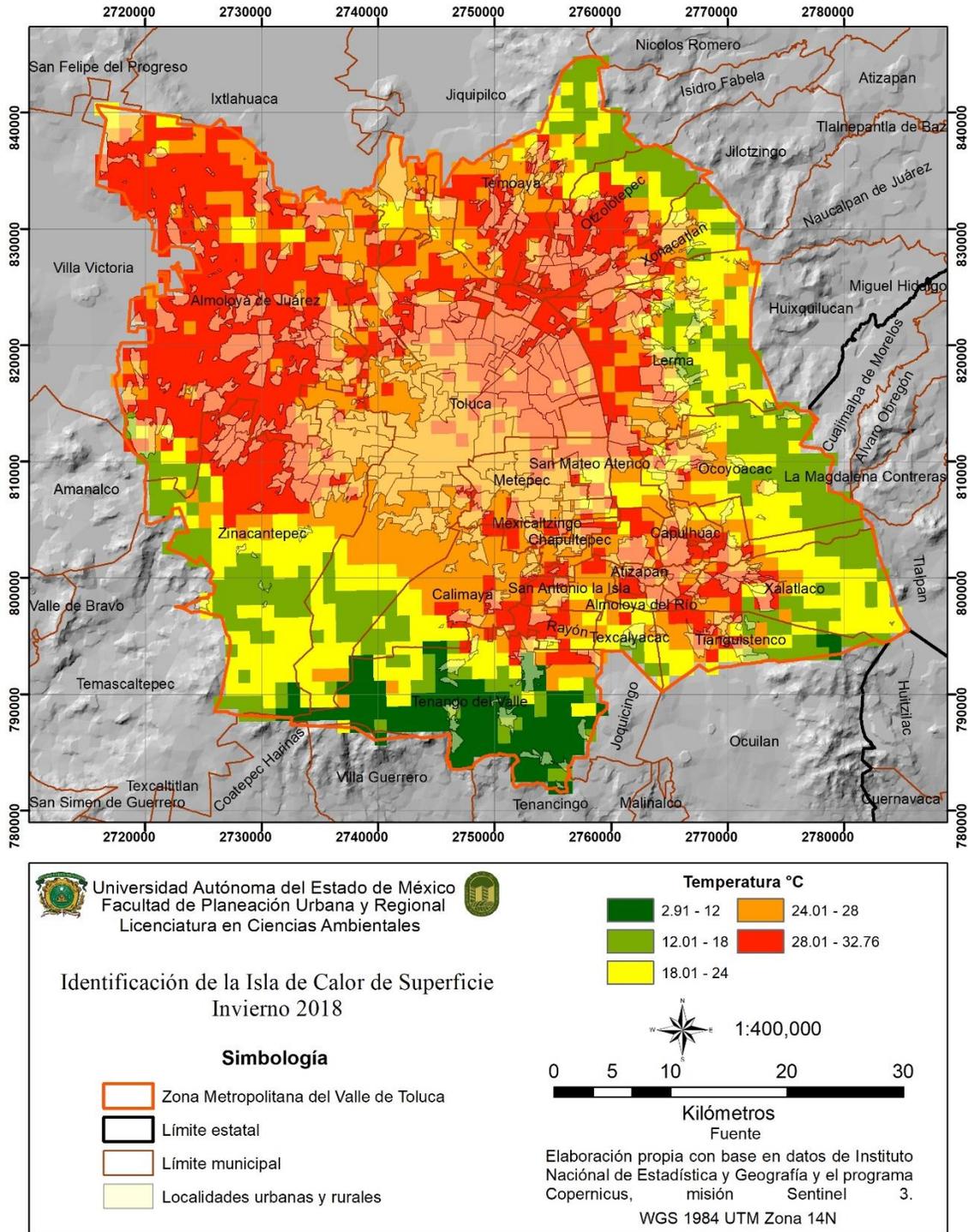
En la Imagen 4.9 podemos observar que los datos de temperatura superficial y cobertura vegetal recabados para el periodo Otoño 2018 – 2020, muestran un comportamiento similar al caso de la temporada de Verano, pues el rango de temperatura de entre 15 y 30 °C es donde se encuentra la saturación de puntos, indicando que estas temperaturas se registraron en zonas donde la vegetación era medianamente abundante, dado que se encuentran en un rango de 0.4 y 0.6 en el eje de las abscisas.

Para el caso del Otoño de 2018, el diagrama de dispersión muestra que los rangos de temperatura que se encuentran entre 17.5 y 30 °C son los más registrados y su presencia se identifica sobre zonas donde existe una cubierta de vegetación, que de acuerdo con la información cartográfica, esta puede corresponder a pastizales o zonas de cultivo, mientras que las temperaturas más elevadas se presentan en áreas donde la vegetación es nula o existe presencia de asentamientos humanos y zonas erosionadas.

El caso de 2019 y 2020 es similar, la diferencia es que la concentración máxima de puntos en el diagrama de dispersión se presenta en un rango de temperatura de entre 25 y 30 °C para ambos años, sin embargo, la localización de dichos puntos en el eje de las abscisas para el caso de 2019 se encuentra en zonas donde las imágenes perciben zonas con una abundancia media de vegetación, que puede traducirse a pequeños parques y áreas cultivadas, mientras que el caso de 2020, la concentración de puntos se presenta para este eje en áreas donde puede existir la presencia de pastos y arbustos que disminuyen la temperatura superficial.

4.4 Temperatura superficial invierno

4.4.1 Invierno diurno 2018



Mapa 4.19 Identificación de la Isla de Calor diurna, invierno 2018.
 Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

Los registros de temperatura superficial que se muestran en el mapa 4.19 corresponden a la tarde del día 23 de enero de 2018, en estos se muestra que el rango de temperatura superficial más baja se encuentra entre 2.91 y 12 °C, principalmente sobre el municipio de Tenango del Valle. Por otra parte, la temperatura más alta se registra en un rango de 28.01 y 32.76 °C y se localizan principalmente en el municipio de Almoloya de Juárez, el norte de Toluca, Zinacantepec, San Mateo Atenco, Metepec, la zona oeste de los municipios de Lerma, Xonacatlán, Xalatlaco y el sur de Temoaya, Oztolotepec, Calimaya, Rayón, Atizapán, Almoloya del Río y Tianguistenco.

Temperatura °C	Hectáreas	%
2.91 – 12	13799.57	5.11%
12.01 – 18	35554.60	13.18%
18.01 -24	47990.32	17.78%
24.01 – 28	76555.72	28.37%
28.01 – 32.76	95956.75	35.56%

Tabla 4.19 Área ocupada por temperaturas, invierno diurno 2018.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.19

Área ocupada por temperaturas registradas

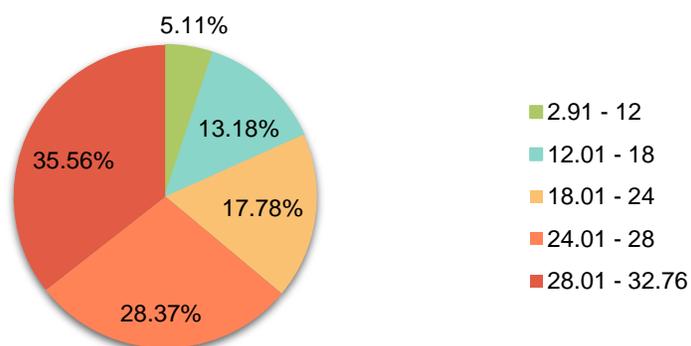
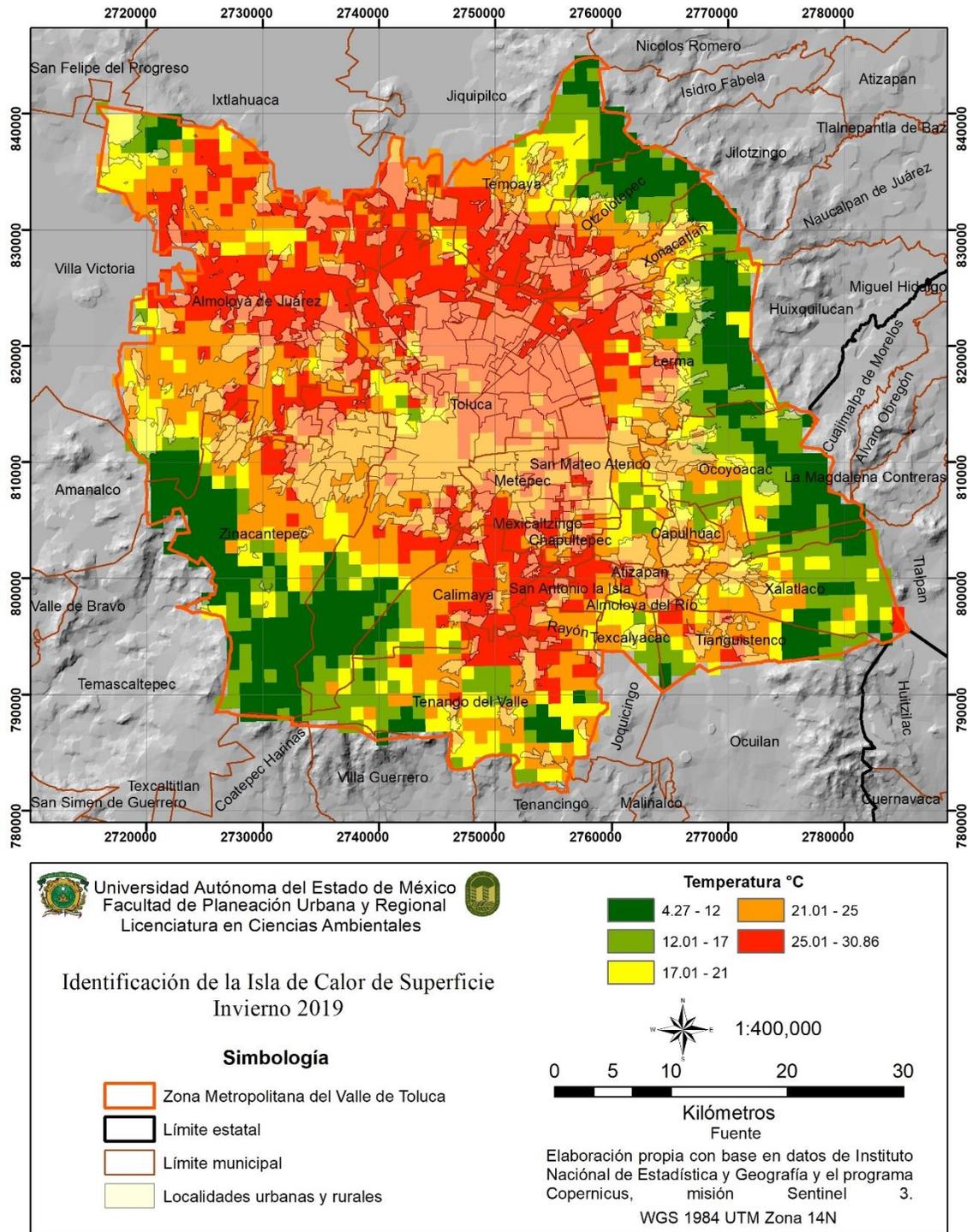


Gráfico 4.19 Área ocupada por temperaturas, invierno diurno 2018.
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.19, Mapa 4.19.

Por otra parte, el 35.56% del total de la ZMVT lo abarcan temperaturas en el rango de 28.01 a 32.76 °C, mientras que las temperaturas en un rango de 2.91 y 12 °C ocupan el 5.11% del territorio.

4.4.2 Invierno diurno 2019



Mapa 4.20 Identificación de la Isla de Calor diurna, invierno 2019.
 Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

La temperatura superficial registrada para la tarde del día 27 de enero de 2019 se encuentra representada en el mapa 4.20, en el que se observa que el rango de temperaturas más elevadas se encuentra entre 25.01 y 30.86 °C sobre los municipios de Almoloya de Juárez, Toluca, Temoaya, Oztolotepec, Xonacatlán, la zona oeste del municipio de Lerma, así como los municipios de Metepec, San Mateo Atenco, San Antonio la Isla, Chapultepec, Mexicaltzingo y la zona norte de los municipios de Calimaya y Tenango del Valle principalmente.

Por otra parte, la temperatura más baja registrada se encuentra en un rango de 4.27 a 12 °C, en superficies localizadas en el este de la ZMVT y la zona suroeste de la misma, principalmente en los municipios de Zinacantepec, Toluca y Almoloya de Juárez.

Temperatura °C	Hectáreas	%
4.27 – 12	36683.45	13.59%
12.01 – 17	33289.08	12.33%
17.01 -21	32520.47	12.05%
21.01 – 25	85770.52	31.78%
25.01 - 30.86	81619.72	30.24%

Tabla 4.20 Área ocupada por temperaturas, invierno diurno 2019.

Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.20.

Área ocupada por temperaturas registradas

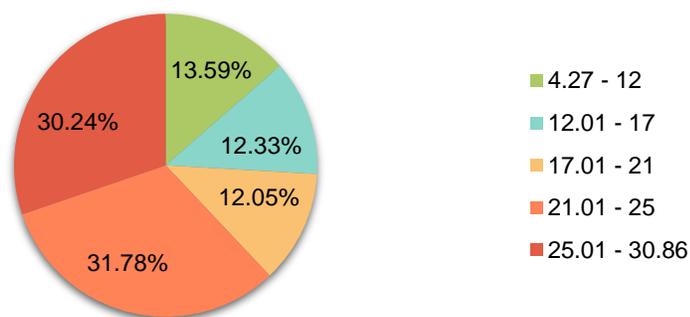
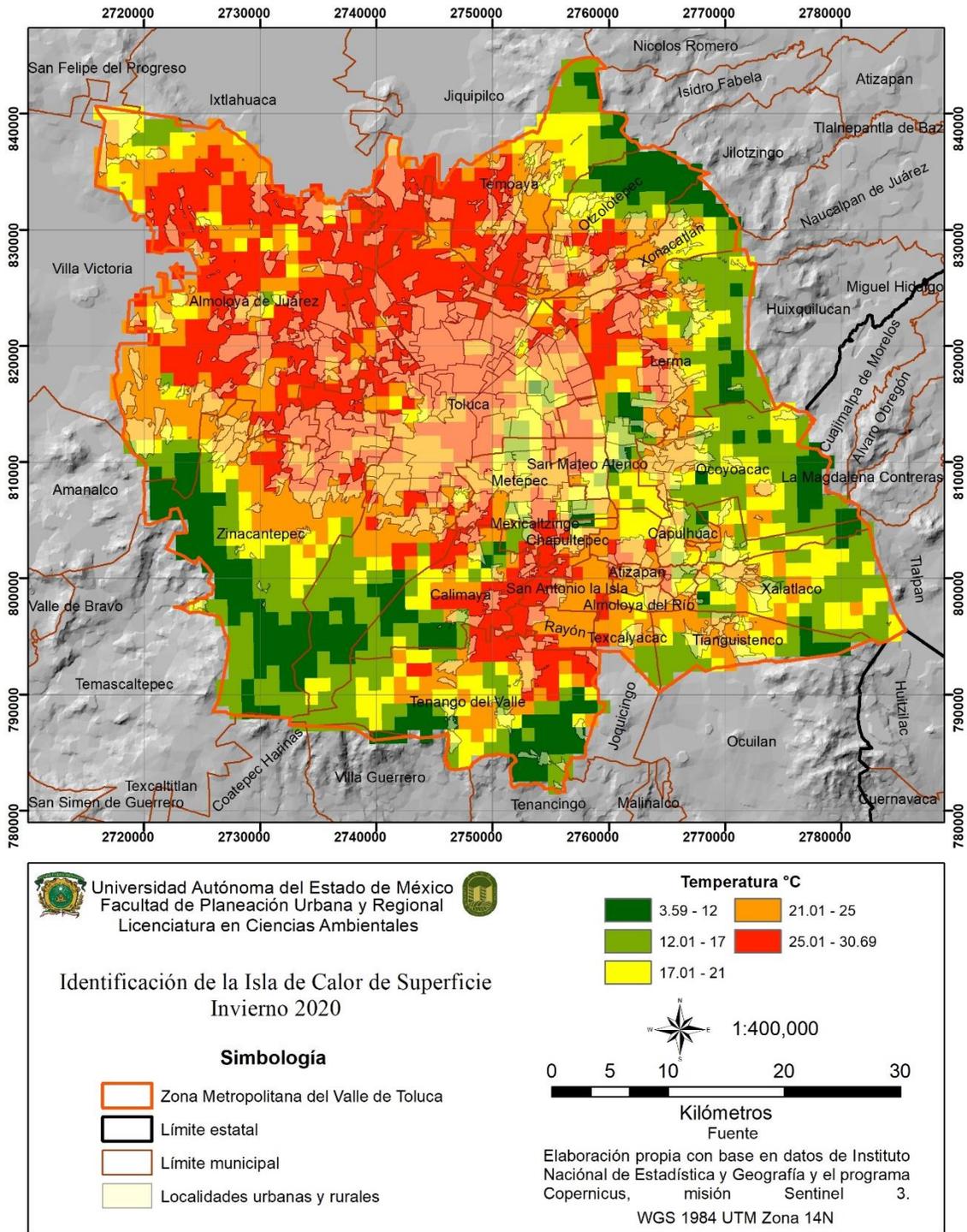


Gráfico 4.20 Área ocupada por temperaturas, invierno diurno 2019.

Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.20, Mapa 4.20.

El rango de temperatura que presenta una mayor incidencia en la ZMVT corresponde al rango de 21.01 a 25 °C, con un porcentaje del 31.78% del total del área de estudio, mientras que el rango de temperatura con una menor área se encuentra entre 17.01 y 21 °C, ocupando una superficie equivalente al 12.05%.

4.4.3 Invierno diurno 2020



Mapa 4.21 Identificación de la Isla de Calor diurna, invierno 2020.
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

Los datos que se presentan en el mapa 4.21 representan la temperatura superficial en la ZMVT que se registró la tarde del día 25 de enero de 2020, donde la temperatura más baja registrada se encontró en un rango de 3.59 a 12 °C, principalmente en la zona suroeste, al sur de los municipios de Almoloya de Juárez, Zinacantepec, Toluca, Calimaya y Tenango del Valle, así como en la zona este, de la ZMVT.

Mientras que las temperaturas más altas se registran en un rango de 25 a 30.69 °C, y se encuentran principalmente al norte de la zona de estudio, en los municipios de Almoloya de Juárez, Temoaya, una parte de Toluca y Otzolotepec; este rango de temperatura se puede observar también en la zona centro-sur en municipios como San Mateo Atenco, Metepec, Chapultepec y Calimaya.

Temperatura °C	Hectáreas	%
3.59 – 12	27386.14	10.11%
12.01 – 17	49320.52	18.21%
17.01 -21	38962.04	14.39%
21.01 – 25	70365.15	25.98%
25.01 - 30.69	84777.52	31.31%

Tabla 4.21 Área ocupada por temperaturas, invierno diurno 2020
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.21

Área ocupada por temperaturas registradas

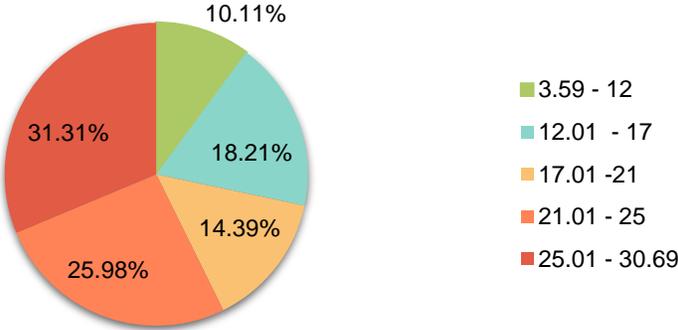
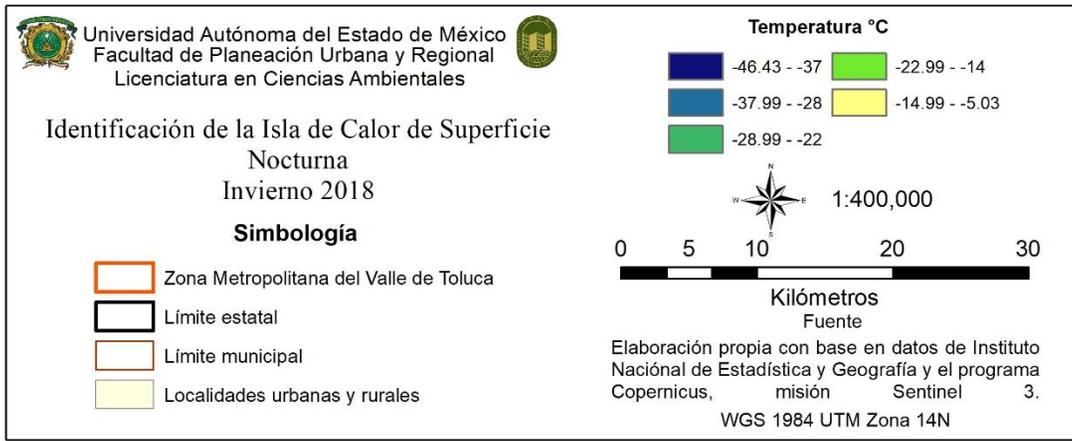
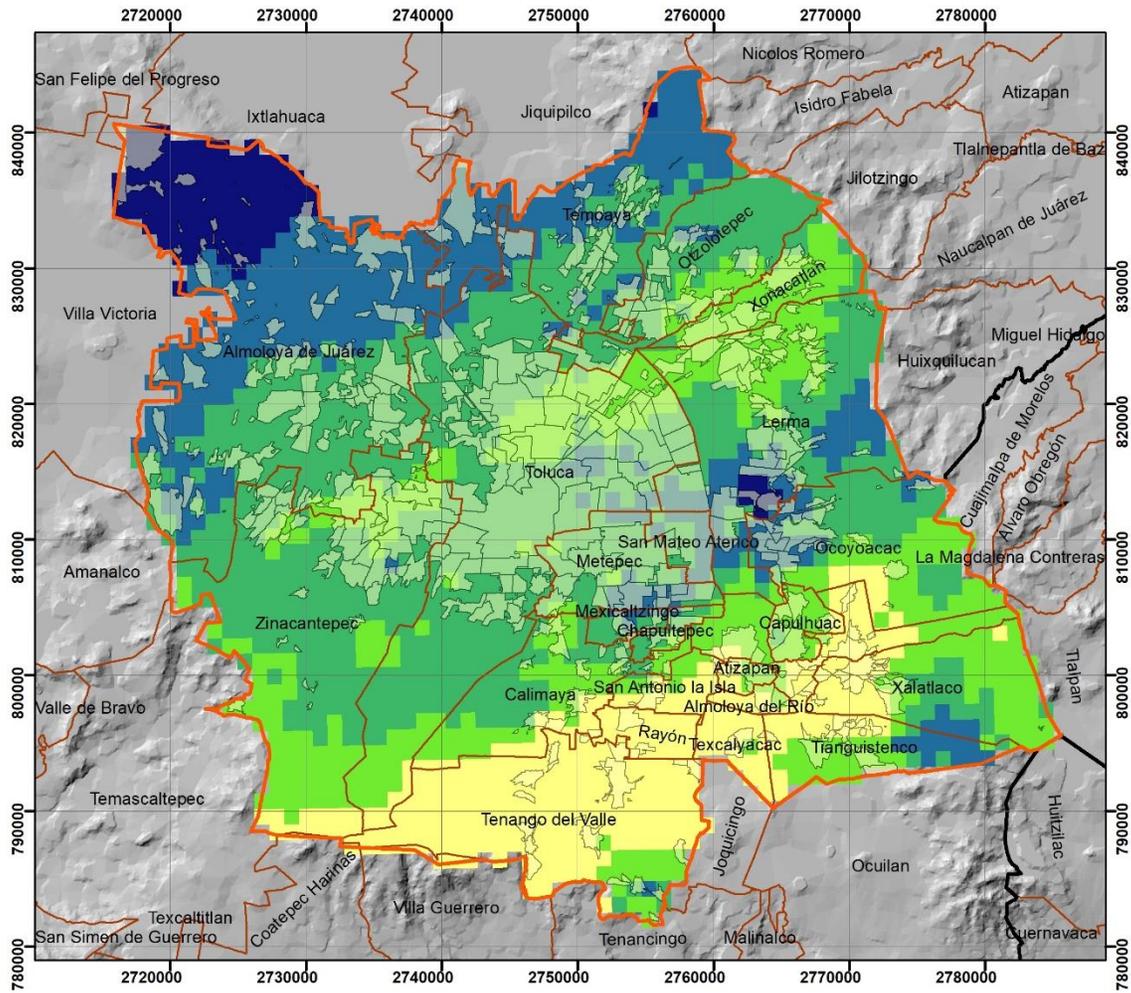


Gráfico 4.21 Área ocupada por temperaturas, invierno diurno 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.21, Mapa 4.21.

En el gráfico 4.21 se observa que el rango de temperatura de entre 25.01 a 30.69 °C es el que ocupa un mayor porcentaje de área de la ZMVT, con un 31.31% del total, mientras que el rango de temperatura que menos se presenta se encuentra en el rango de 3.59 a 12 °C, con un porcentaje equivalente al 10.11%.

4.4.4 Invierno nocturno 2018



Mapa 4.22 Identificación de la Isla de Calor nocturna, invierno 2018.
 Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

Para el caso de la isla de calor nocturna, se presentan en el mapa 4.22 los registros de temperatura superficial de la noche del 30 de enero de 2018, donde se observa que el rango de temperatura más elevada se encuentra entre los -14.99 y -5.03 °C y se presenta en los municipios del sur de la ZMVT, principalmente en Tenango del Valle, Rayón, Texcaliacac, Tianguistenco y San Antonio la Isla. Mientras que las temperaturas más bajas oscilan entre -46.43 y -37 °C, y se presentan en el noroeste del municipio de Almoloya de Juárez y el suroeste de Lerma.

Temperatura °C	Hectáreas	%
—46.43 - —37	11552.59	4.28%
—37.99 - —28	48539.39	17.99%
—28.99 - —22	111465.30	41.31%
—22.99 - —14	59664.04	22.11%
—14.99 - —5.03	38615.37	14.31%

Tabla 4.22 Área ocupada por temperaturas, invierno nocturno 2018.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.22

Área ocupada por temperaturas registradas

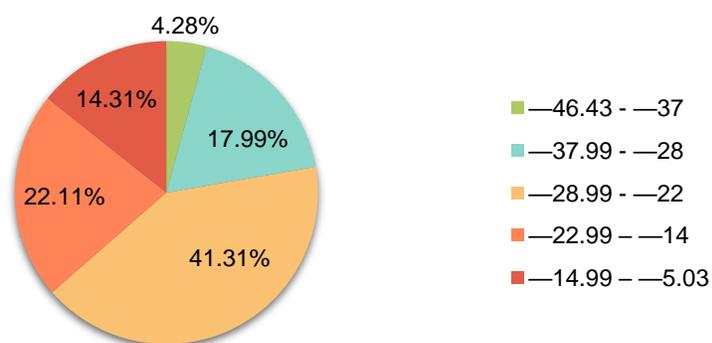
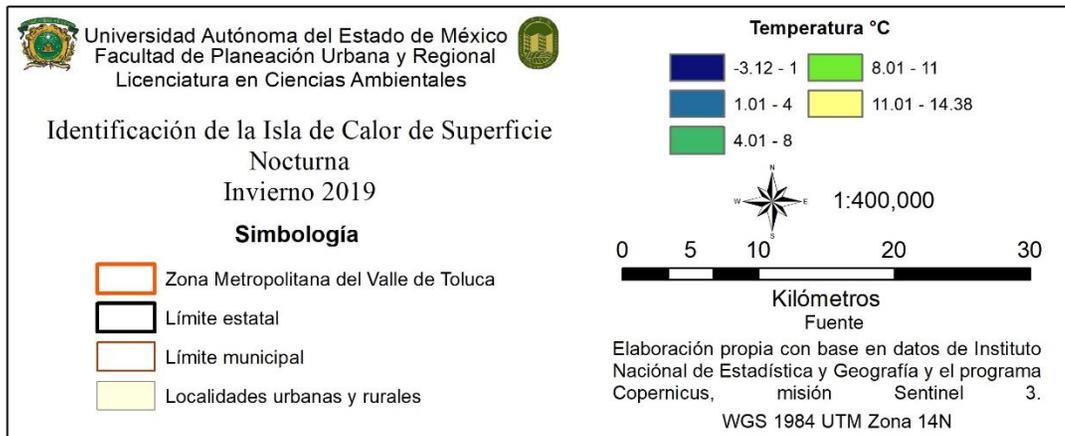
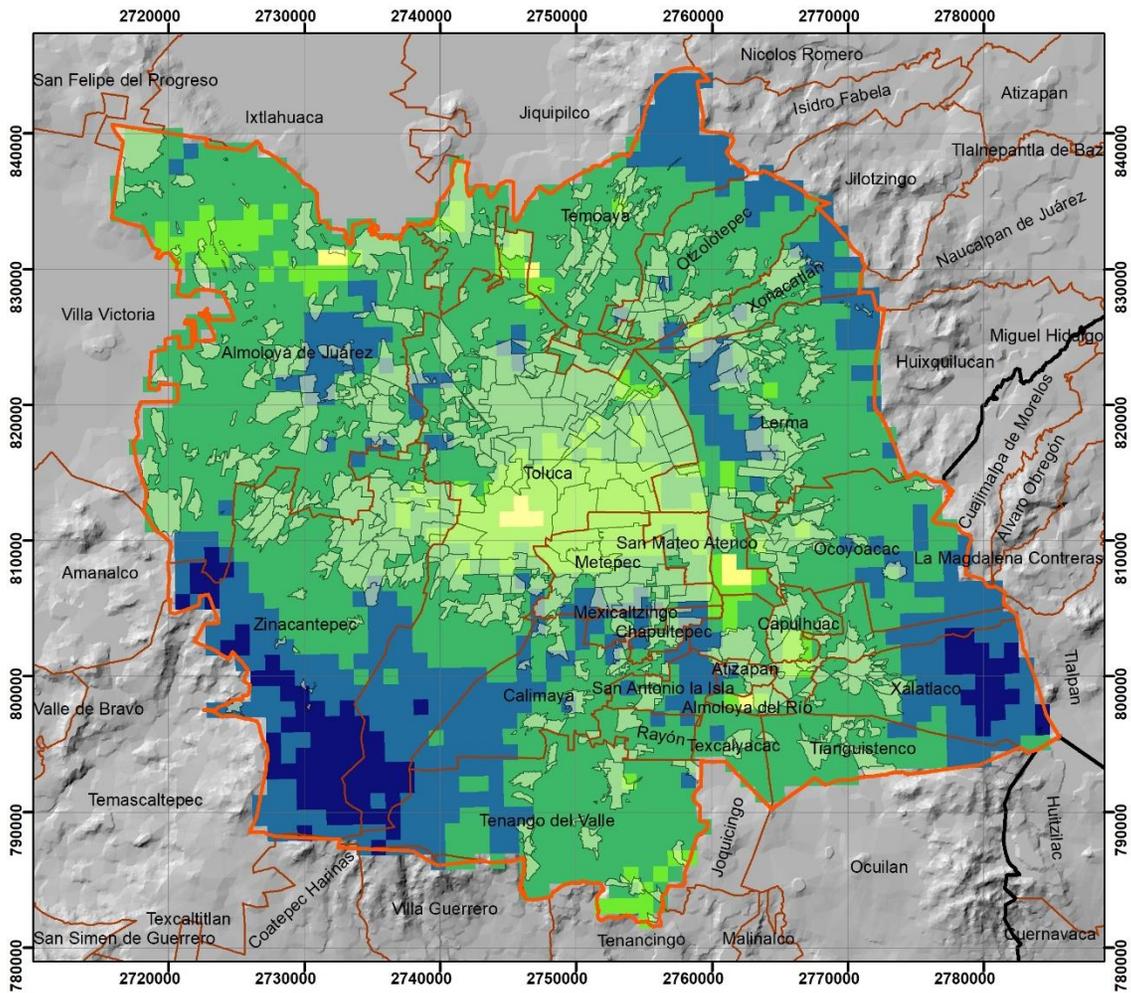


Gráfico 4.22 Área ocupada por temperaturas, invierno nocturno 2018.
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.22, Mapa 4.22

En el Gráfico 4.22 se puede observar que el rango de temperatura superficial que oscila entre los -28.99 y -22 °C es el que presenta una mayor cantidad de registros dentro del territorio de la ZMVT, ocupando un 41.31% del total, por otra parte, solamente el 4.28% es ocupado por el rango de temperatura que se encuentra entre -46.43 y -37 °C.

4.4.5 Invierno nocturno 2019



Mapa 4.23 Identificación de la Isla de Calor nocturna, invierno 2019.
 Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

Se tomaron los datos registrados la noche del 27 de enero de 2019 correspondientes a temperatura superficial que se presentan en el Mapa 4.23, en el cual se observa que el rango de temperatura más elevado se registra entre 11.01 y 14.38 °C, se registra principalmente en la zona centro del municipio de Toluca, el norte de Almoloya de Juárez, el sur de Temoaya y Lerma.

En cuanto al rango de temperatura superficial más baja, se registra entre -3.12 y 1 °C y se sitúa en el suroeste de Zinacantepec, el sur de Toluca y la zona este del municipio de Xalatlaco.

Temperatura °C	Hectáreas	%
—3.12 – 1	11715.40	4.33%
1.01 – 4	56609.12	20.91%
4.01 – 8	179803.53	66.40%
8.01 – 11	21359.10	7.89%
11.01 – 14.38	1281.21	0.47%

Tabla 4.23 Área ocupada por temperaturas, invierno nocturno 2018
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.23

Área ocupada por temperaturas registradas

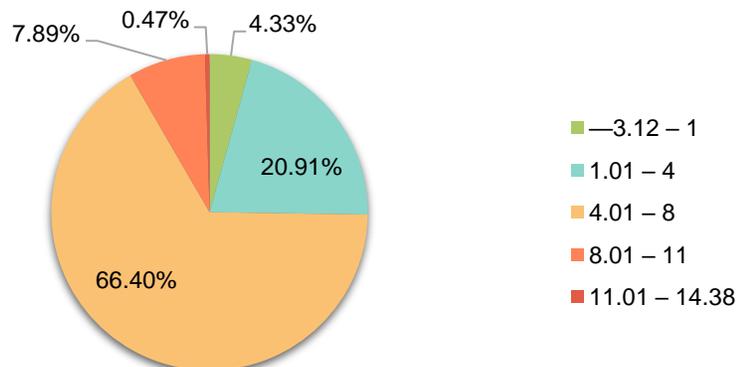
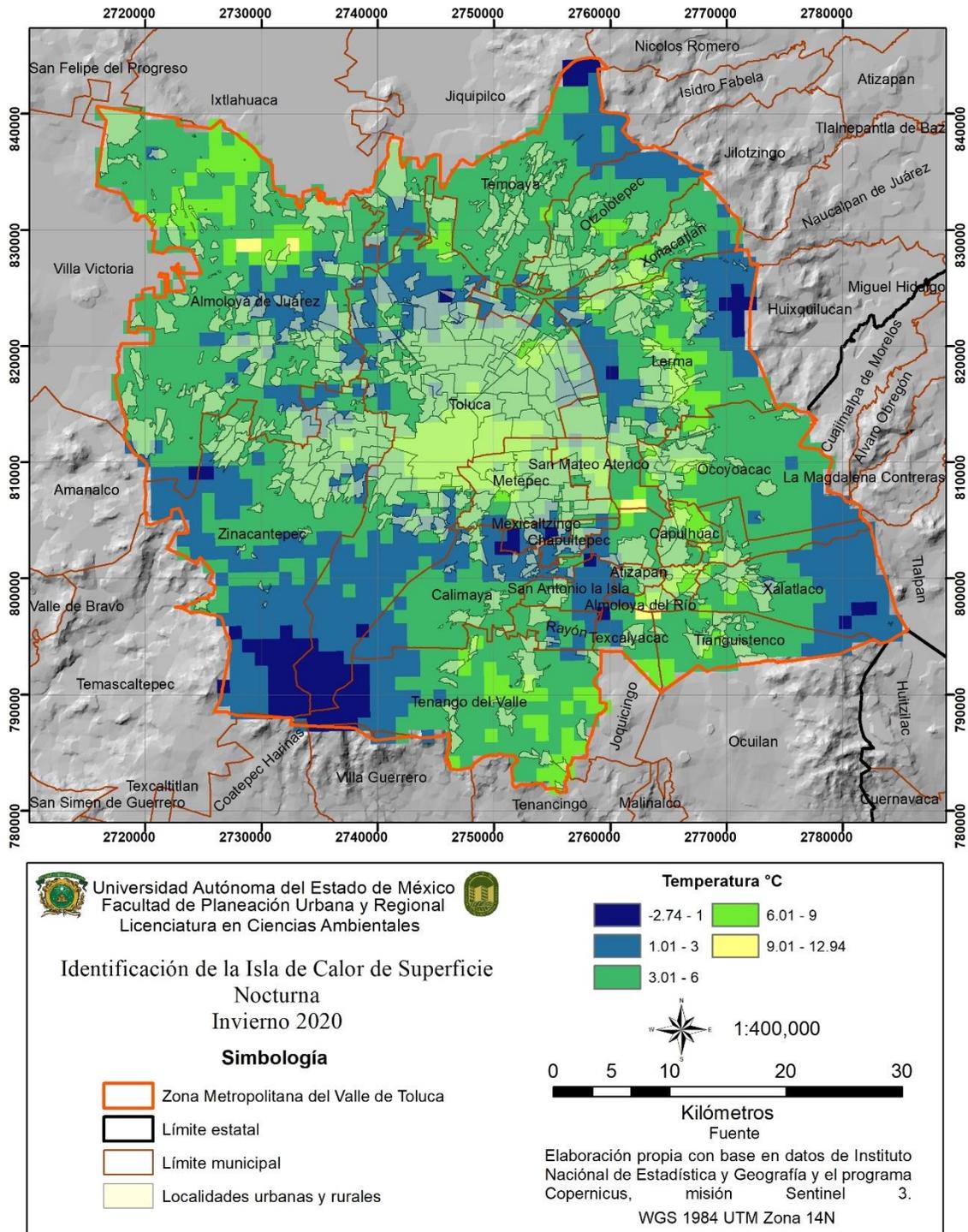


Gráfico 4.23 Área ocupada por temperaturas, invierno nocturno 2019.
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.23, Mapa 4.23

Se puede observar en el Gráfico 4.23 que el rango de temperatura superficial que se presenta en una mayor parte del territorio de la ZMVT se encuentra entre 4.01 y 8 °C con un porcentaje del 66.40% respecto al total del área de estudio; mientras que el rango de temperatura superficial más elevada registrada entre 11.01 y 14.38 °C se presenta solamente en un 0.47% del territorio.

4.4.6 invierno nocturno 2020



Mapa 4.24 Identificación de la Isla de Calor nocturna, invierno 2019.
Fuente: elaboración propia con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

Para la isla de calor nocturna, se utilizaron los datos de temperatura superficial registrados la noche del 25 de enero de 2020 que se presentan en el Mapa 4.24, donde se observa que el rango de temperatura superficial más elevado se encuentra entre 9.01 y 12.94 °C y se localiza en el norte de Almoloya de Juárez, el sur de Temoaya, Lerma y el centro de Toluca.

Mientras que la temperatura superficial más baja se registró entre -2.74 y 1 °C principalmente en la zona norte de Temoaya, el este de Lerma, el sureste de Xalatlaco, el sur de Toluca, Zinacantepec y el oeste de Tenango del Valle.

Temperatura °C	Hectáreas	%
-2.74 - 1	9249.39	3.43%
1.01 - 3	68336.17	25.33%
3.01 - 6	167137.85	61.96%
6.01 - 9	24272.72	9.00%
9.01 - 12.94	762.44	0.28%

Tabla 4.24 Área ocupada por temperaturas, invierno nocturno 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3, Mapa 4.24

Área ocupada por temperaturas registradas

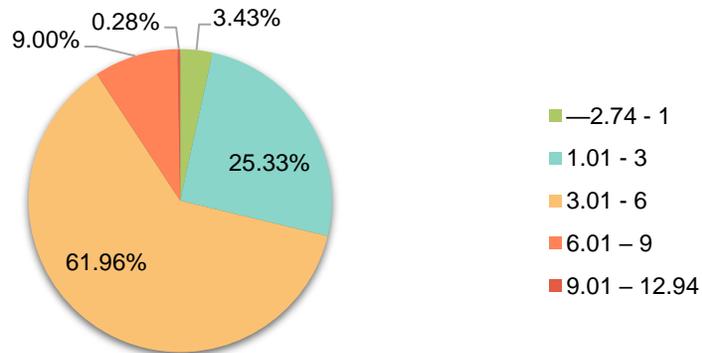


Gráfico 4.24 Área ocupada por temperaturas, invierno nocturno 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de tabla 4.24, Mapa 4.24

De acuerdo con el Gráfico 4.24, en el 0.28% del territorio de la ZMVT se registraron temperaturas superficiales de entre 9.01 y 12.94 °C, mientras que el rango correspondiente a 3.01 y 6 °C se registró en el 61.96% del área de estudio.

4.4.7 Análisis de temperatura superficial invierno diurno 2018 – 2020

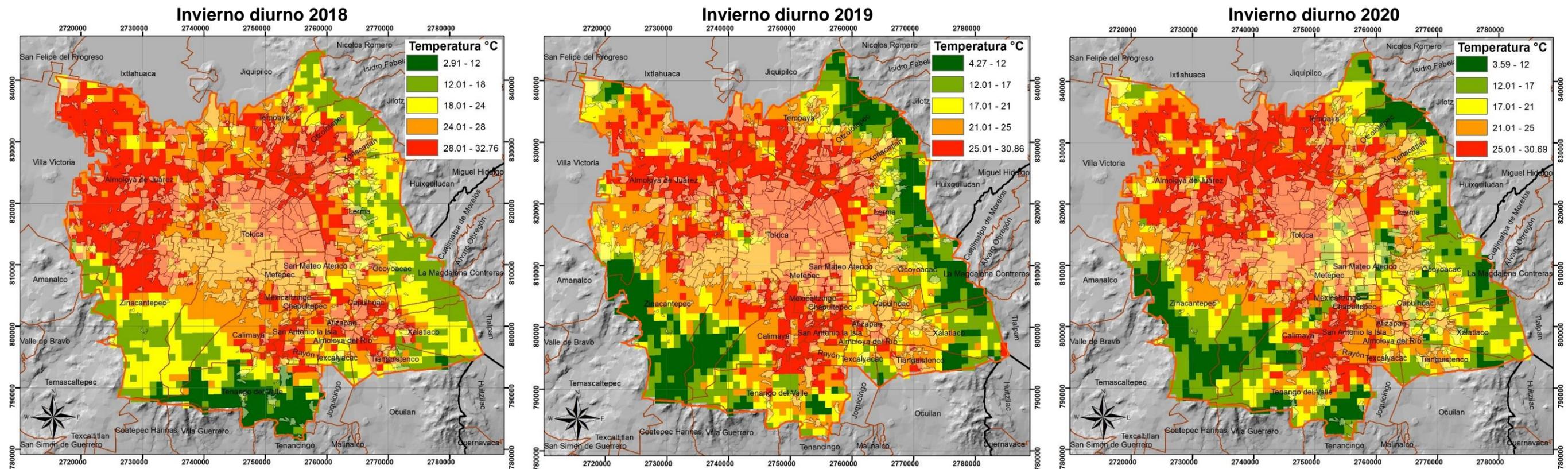


Imagen 4.10 Análisis de temperatura superficial correspondiente a la temporada de invierno diurno de los años 2018- 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3 e INEGI 2020.

En el invierno de los años 2020, 2019 y 2018, se registran datos de la temperatura superficial más alta en rangos similares para los tres años, siendo la más alta de 32.76 (2018), 30.86 (2019) y 30.69 (2020) y ocupan porcentajes de área altos con respecto a los demás rangos de temperatura, con poco más del 30% para los tres años (Imagen 4.10). La distribución espacial de las temperaturas más elevadas se muestra en un patrón similar para los años 2020 y 2019, dado que ocupan la mayor parte de la zona centro-norte de la ZMVT, mientras que la distribución para el año 2018 se presenta sobre la zona norte principalmente.

Por otra parte, las temperaturas superficiales más bajas se presentan en el año 2018, con un rango de temperatura que oscila entre 2.91 y 12 °C, localizadas en la zona sur de la ZMVT, principalmente en el sur de Tenango del Valle, con un porcentaje de ocupación de 5.11%. Sin embargo, en el año 2019 se registra un mayor porcentaje de ocupación para las temperaturas más bajas (4.27 a 12 °C) con un 13.59% del total del territorio de la ZMVT, y se localizan principalmente en el suroeste y noreste de la ZMVT.

4.4.8 Análisis de temperatura superficial invierno nocturno 2018 – 2020

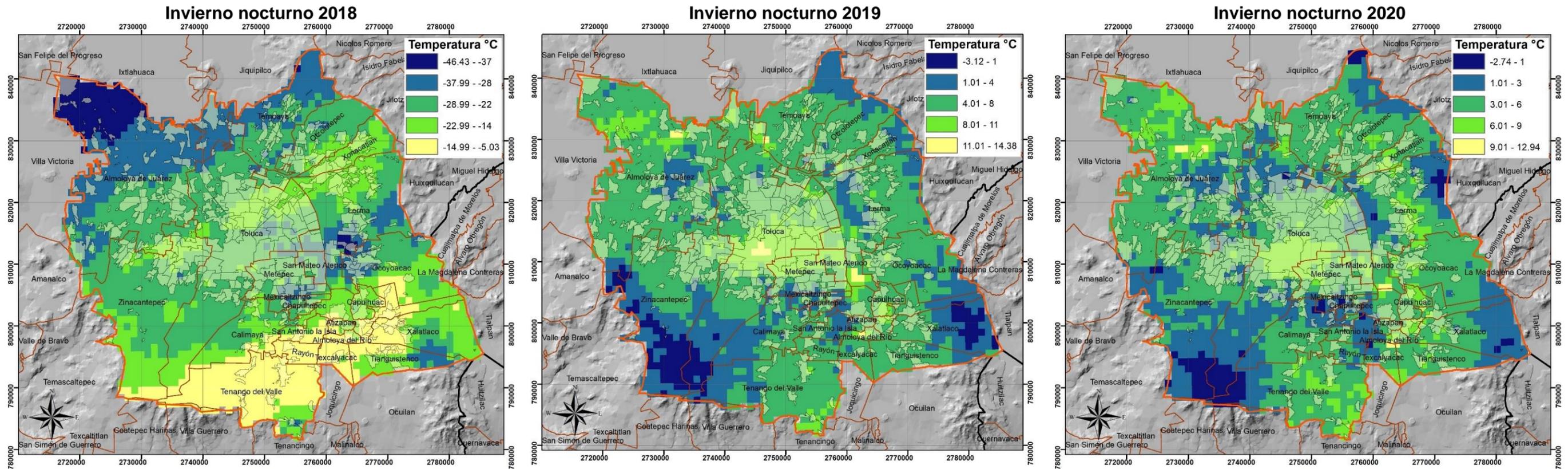


Imagen 4.11 Análisis de temperatura superficial correspondiente a la temporada de invierno nocturno de los años 2018- 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3 e INEGI 2020.

Para el análisis nocturno del periodo invierno, se muestra la comparación de los registros de temperatura superficial de los tres años en la Imagen 4.11, donde se puede observar que la distribución espacial de la temperatura es similar para los años 2020 y 2019, sin embargo, en el año 2018 se observa una distribución diferente, pero que concuerda con los resultados diurnos del mismo año.

En este caso, las temperaturas más bajas se registraron de hasta -2.74, -3.12 y -46.43 °C para los años 2020, 2019 y 2018 respectivamente, siendo el año 2018 en el que se registran las temperaturas más bajas. Mientras que la temperatura más alta se registró en el invierno de 2019, con 14.38 °C.

4.4.9 Correlación vegetación y espacios urbanos vs temperatura invierno diurno 2018 – 2020.

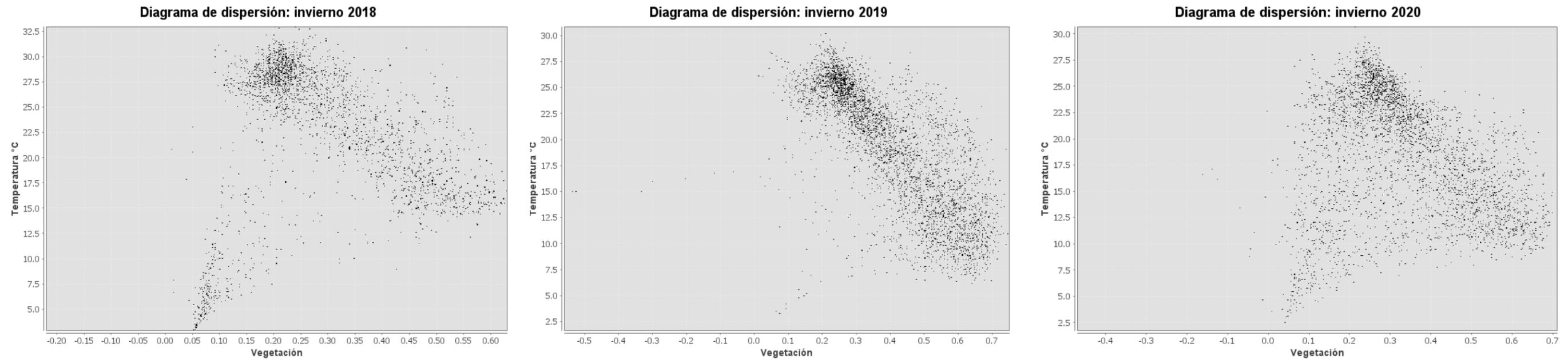


Imagen 4.12 Correlación vegetación / temperatura invierno diurno 2018 – 2020.
Fuente: elaboración propia a partir de Sentinel 3.

Como puede verse en la Imagen 4.12, el patrón de distribución en los diagramas de dispersión para la temporada invernal de los años 2018 a 2020 se asemeja a los datos obtenidos durante la primavera para el mismo periodo de tiempo. En los tres casos la acumulación de puntos más alta se localiza entre los rangos de temperatura que van de 25 a 32.5 °C para el caso de 2018, de 20 a 27.5 °C para el caso de 2019, y 22.5 a 27.5 °C para el caso de 2020.

En los tres casos la concentración de puntos se produce en rangos de NDVI donde se identifica la presencia de zonas donde la vegetación es nula o existen asentamientos humanos, además se muestra que para el caso de Invierno de 2018, la concentración de puntos es menor a la que se presenta en los dos años siguientes, pues aunque la forma que adopta es parecida, la distribución de los datos se acentúa a partir de la presencia de áreas con poca o nula vegetación y espacios construidos, mostrando un descenso en la temperatura conforme aumenta la presencia de vegetación.

4.5 Análisis de temperatura superficial 2018

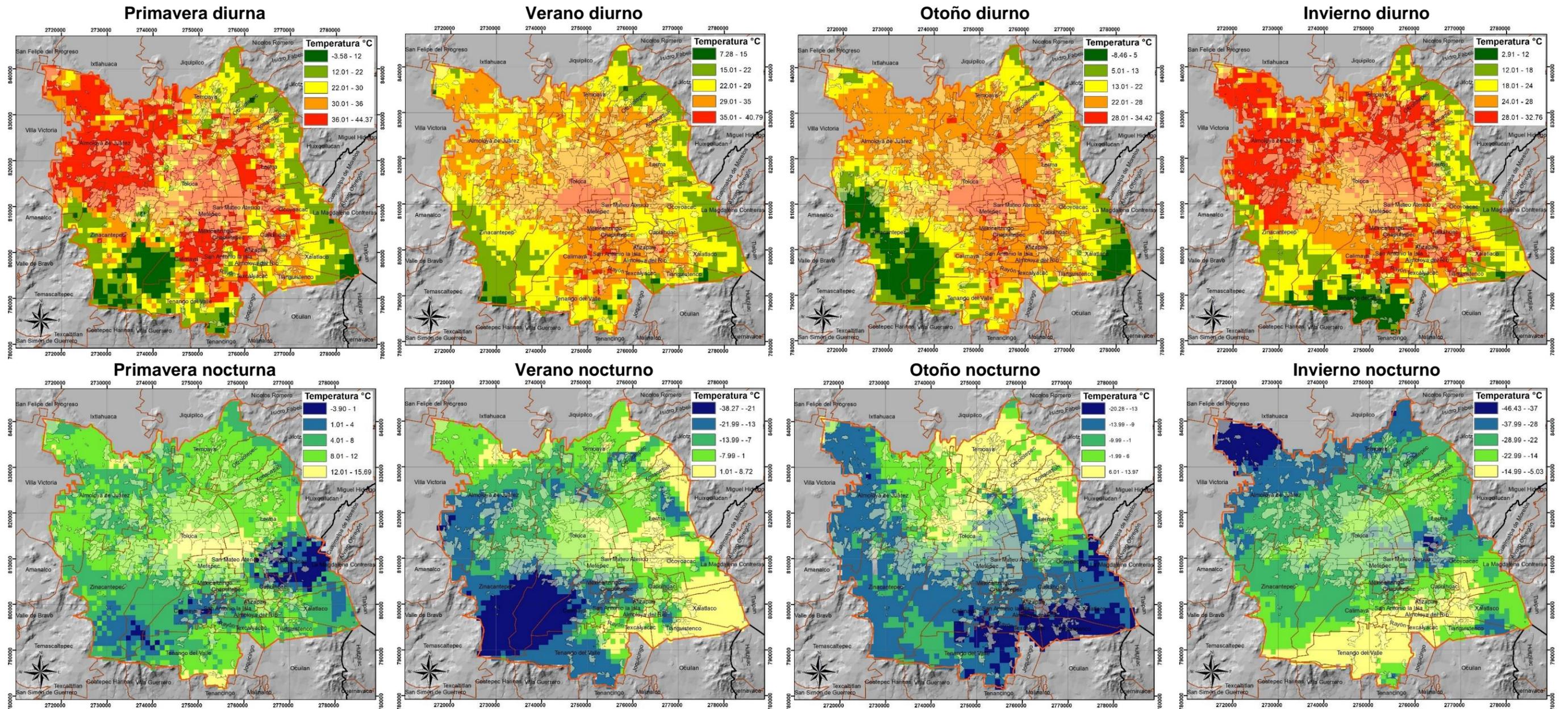


Imagen 4.13 Análisis de temperatura superficial correspondiente al año 2018.
Fuente: elaboración propia, con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

En la Imagen 4.13 se puede observar que, durante el año 2018, las temperaturas superficiales más elevadas se registraron durante la primavera y el invierno, en las imágenes diurnas se observa la presencia de dos Islas de Calor para el caso de primavera, la primera sobre el municipio de Almoloya de Juárez y la segunda con una dispersión irregular sobre la zona centro-este de la ZMVT, principalmente sobre los municipios de San Mateo Atenco, Toluca, Metepec y Lerma.

Mientras que, para el caso de invierno, pueden identificarse tres Islas de Calor, las dos más grandes en la zona norte de la ZMVT, sobre los municipios de Almoloya de Juárez y Zinacantepec, además de la zona norte de Toluca San Mateo Atenco, el sur de Temoaya, Oztolotepec, Xonacatlán y la zona oeste de Lerma. La tercera Isla de Calor se presenta de manera dispersa, por lo que podría ser catalogada como un conjunto de archipiélagos, dispersos en la zona sureste de la ZMVT.

Para los casos de Verano y Otoño diurnos del mismo año, se puede identificar una Isla de Calor más definida, cuya distribución espacial se centra en los municipios de Toluca, Metepec y San Mateo Atenco para el caso de Verano, mientras que para el caso de Otoño la Isla de Calor amplía su distribución hacia la zona oeste del municipio de Lerma.

Para el caso nocturno, se puede observar que la distribución de temperaturas es diferente al caso diurno, dado que para la primavera se presentan las temperaturas más elevadas en la zona centro del municipio de Toluca y el norte de Metepec y San Mateo Atenco, mientras que para el Verano esta distribución cambia y las temperaturas más elevadas se concentran en la zona sureste de la ZMVT, en el caso de Otoño, las temperaturas más elevadas se concentran en el cuadrante noreste de la zona de estudio y para el Invierno se muestra una concentración de las temperaturas más elevadas en la zona sur de la ZMVT, principalmente sobre los municipios de Tenango del Valle, Rayón y Texcaliacac.

4.6 Análisis de temperatura superficial 2019

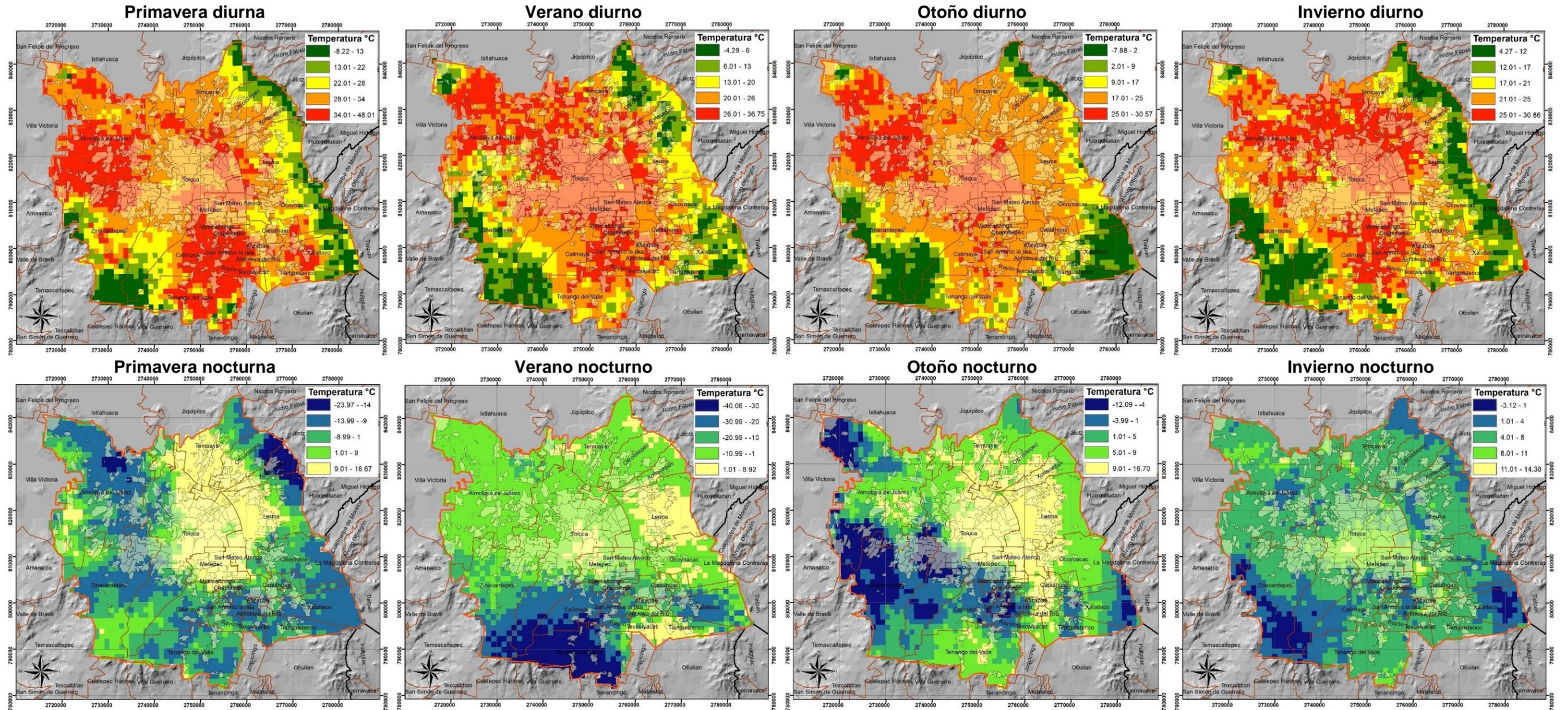


Imagen 4.14 Análisis de temperatura superficial correspondiente al año 2019.
Fuente: elaboración propia, con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

Para el año 2019, podemos observar en la Imagen 4.14 que la temperatura se distribuye de manera similar para las cuatro estaciones, manteniendo una temperatura superficial elevada a lo largo del año.

Analizando los patrones de distribución, se observa que las Islas de Calor de Primavera diurna se presentan una al noroeste de la ZMVT y la segunda al sureste, con una franja de calor superficial que se presenta al oeste del municipio de Lerma y al sur de los municipios de Oztolotepec, Temoaya y el norte de Toluca. Mientras que las Islas de Calor que se presentan para el caso de Verano e Invierno muestran una distribución similar, dado que las zonas con temperatura superficial más elevada se localizan de sur a noreste, abarcando un porcentaje más elevado de territorio que en los casos de Primavera y Otoño.

Para este último, las Islas de Calor son más reducidas, la primera se localiza en el centro de la ZMVT, principalmente sobre el municipio de Toluca y municipios aledaños como San Mateo y Metepec, mientras que la segunda cubre gran parte del territorio correspondiente al municipio de Almoloya de Juárez.

En cuanto al análisis nocturno, se observa que los patrones de distribución de la temperatura se modifican, pues para la Primavera se muestra que las temperaturas más elevadas se registran en las superficies de los municipios de Toluca, Metepec, Lerma, San Mateo Atenco, el sur de Temoaya, Oztolotepec y Xonacatlán. Para el caso del Verano, las temperaturas más elevadas se muestran en la zona centro de Toluca, el norte de Metepec, Lerma y en menor medida al norte y sur de la ZMVT, sobre municipios como Tianguistenco y Oztolotepec.

Para el caso de Otoño, la distribución de temperatura superficial más elevada se muestra similar al caso de Primavera, sin embargo, amplía la superficie hacia el sur, en municipios como Ocoyoacac, Capulhuac y Tianguistenco, al tiempo que se reduce en la zona norte, descartando municipios como Temoaya. En el Invierno, la temperatura más elevada se muestra en un rango bajo de extensión territorial, presentándose solamente en el municipio de Toluca y el sur de Lerma.

4.7 Análisis de temperatura superficial 2020

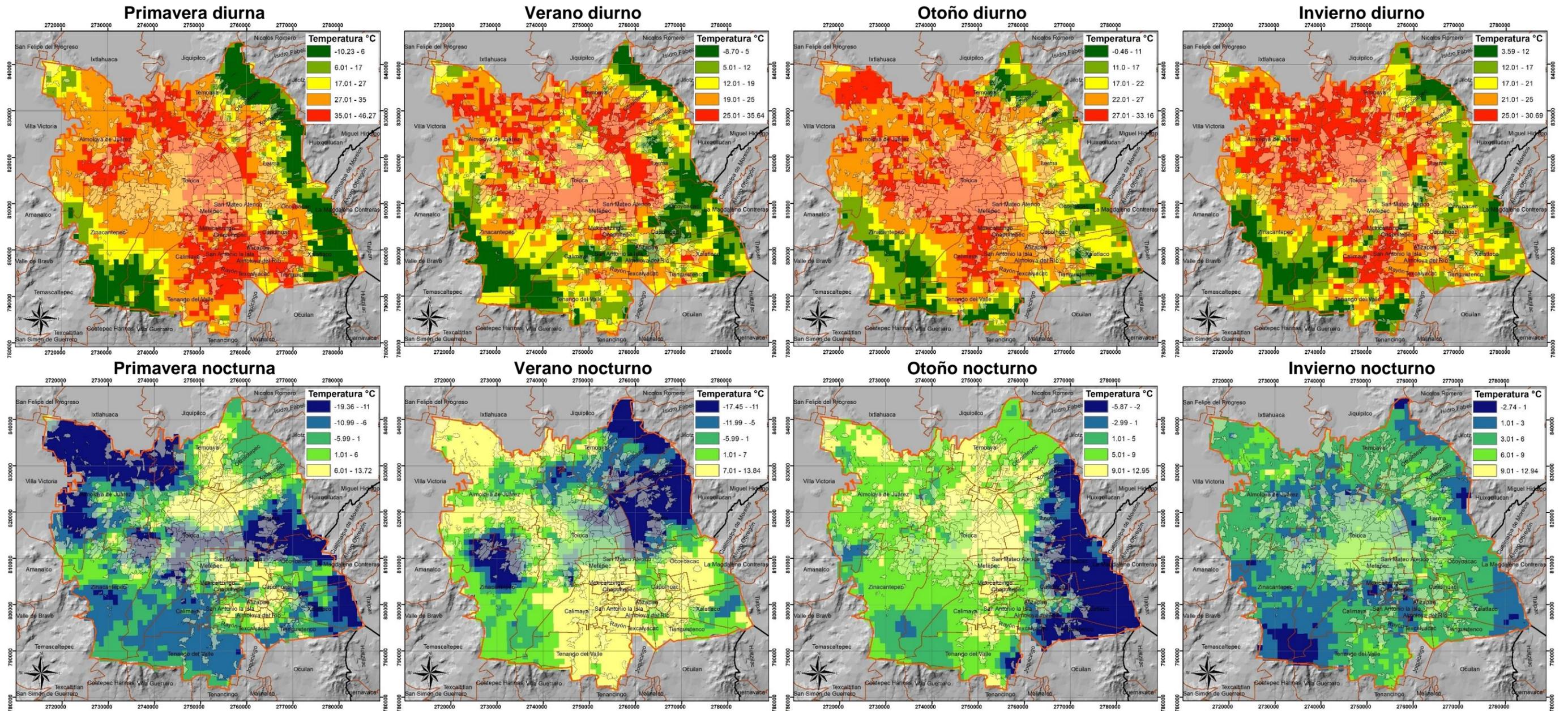


Imagen 4.15 Análisis de temperatura superficial correspondiente al año 2020.
Fuente: elaboración propia, con base en Sentinel 3 e INEGI 2020.

La información recopilada para el año 2020 que se muestra en la Imagen 4.15 muestra que, para el caso diurno, las Islas de Calor que se presentan en Invierno y Primavera son las más extensas en cuanto al territorio que ocupan.

De acuerdo con su distribución espacial para el caso de Primavera Diurna, se identifica una Isla de Calor que cubre municipios del sur al norte de la ZMVT, cubriendo principalmente lugares como San Antonio la Isla, Rayón, Atizapán, Metepec y en menor medida municipios como Toluca, Almoloya de Juárez, Temoaya, Tianguistengo y Tenango del Valle.

La distribución de la Isla de Calor para el caso del Verano se muestra de manera irregular, dado que dentro de zonas con temperatura superficial elevada se encuentran pequeños parches de temperatura más baja, sin embargo, se puede considerar que existe la presencia de una Isla de Calor ubicada en el centro-norte de la ZMVT.

La Isla de Calor en Otoño se muestra de manera más clara, ubicada en la zona centro y hacia el norte de la ZMVT, principalmente en municipios como Toluca, Metepec, San Mateo Atenco, Mexicaltzingo y en menor medida en Almoloya de Juárez, Tenango del Valle y Capulhuac.

Para el caso del Invierno, la Isla de Calor se presenta de manera similar al Verano, con pequeños parches de temperatura más baja, sin embargo, la distribución de estos parches hace posible la identificación de dos Islas de Calor, la de mayor tamaño se ubica en el norte de la ZMVT, principalmente en los municipios de Almoloya de Juárez, Toluca, Temoaya, Lerma, San Mateo Atenco y Metepec. Una Isla de Calor más pequeña cubre algunos municipios del sureste de la zona de estudio, algunos de ellos son Mexicaltzingo, Calimaya, San Antonio la Isla y Tenango del Valle.

En cuanto al análisis nocturno, las temperaturas más elevadas se presentan en mayor medida en las temporadas de Verano y Otoño. Para el caso de Primavera, las temperaturas más elevadas se encuentran en municipios de la zona norte, como

Toluca, Temoaya, Oztolotepec, Xonacatlán y Lerma, además de algunos municipios del sur como Metepec, Tianguistenco, Capulhuac, Atizapán, San Antonio la Isla y Almoloya del Río.

En Invierno las temperaturas más elevadas cubren un porcentaje mínimo del territorio y se ubican en Almoloya de Juárez, el sur de Lerma, Tianguistenco y Texcaliacac.

Durante el otoño la distribución de temperatura superficial más elevada se registró en municipios como Toluca, Almoloya de Juárez, Temoaya, Oztolotepec, Tenango del Valle, Mexicaltzingo y Chapultepec.

La temporada de Verano es en la que se presenta una amplia distribución de temperaturas más elevadas, cubriendo un 36.58% del territorio de la zona de estudio, cubriendo gran parte del municipio de Almoloya de Juárez, la zona oeste de Toluca, municipios del sureste como Ocoyoacac, Tianguistenco, Xalatlaco, Capulhuac, Tenango del Valle, Calimaya, Rayón, San Antonio la Isla, Chapultepec y Mexicaltzingo.

4.8 Observaciones generales

Se esperaba identificar la presencia de Islas de Calor en municipios como Toluca, Metepec, San Mateo Atenco, Lerma, Tianguistenco y Ocoyoacac, dadas las características urbanas que presentan estos municipios, sin embargo, a partir del análisis de resultados se encontró que otros municipios presentan registros de temperatura más elevados que algunos de los ya mencionados.

Toluca, Metepec y San Mateo Atenco fueron municipios donde, en la mayoría de los casos estudiados, se registraron temperaturas superficiales que se encontraban dentro de los rangos más elevados, llegando a reportar hasta 48 °C que fue el caso de la Primavera diurna de 2019.

El municipio de Lerma presentó un caso particular, dado que la zona oeste del municipio continuamente se encontraba dentro del rango de temperaturas elevadas,

a pesar de esto, la temperatura se mantuvo, en la mayoría de los casos, dentro de rangos que pueden indicar una zona en transición, dado que la temperatura disminuía en dirección este, donde se encuentran masas forestales que tienen influencia en la temperatura superficial del área, además del Área de Protección de Flora y Fauna Ciénegas del Lerma, que por ser una zona de humedales, tiene la característica de brindar servicios ambientales entre los que se encuentra la regulación de la temperatura.

Caso contrario son los municipios de Santiago Tianguistenco y Ocoyoacac, que presentaron registros abundantes dentro del rango de temperaturas más elevadas para la época de Primavera diurna y en Invierno diurno de 2018, en el resto de las temporadas analizadas se presentaron algunos parches de temperaturas superficiales que fueron clasificadas dentro del rango más elevado, sin embargo, estos se presentaban de manera aislada.

Esto puede deberse a la presencia de masas forestales dentro de los municipios y a la manera en que se encuentran distribuidos los asentamientos humanos en cada uno, para ambos casos los parches de temperatura elevada se presentaron en áreas del territorio donde se registra presencia humana y edificaciones. Sin embargo, también puede considerarse la circulación del viento y el contexto geográfico en el que se encuentran, dado que parte de sus territorios albergan secciones del Parque Estatal Otomí – Mexica, que además de ser un límite natural, cuenta con extensiones importantes de áreas vegetadas y masas forestales.

Conclusiones y recomendaciones



Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se llevó a cabo la identificación y modelado de las Islas de Calor que se presentaron dentro de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, mediante el uso de 24 imágenes satelitales reportadas por el satélite Sentinel 3, disponibles en la plataforma de acceso abierto perteneciente al programa Copernicus de la Unión Europea, cumpliendo el objetivo principal planteado al inicio.

De igual manera, se dio cumplimiento a los objetivos particulares planteados; las imágenes recopiladas fueron obtenidas de días representativos para cada estación del año durante los años 2018, 2019 y 2020; las 24 imágenes obtenidas de la misión Sentinel 3, fueron tratadas con ayuda del software SNAP®, corrigiendo el sistema de coordenadas, el formato de archivo y el área que se deseaba trabajar. El formato inicial de descarga se adaptó para su uso en un sistema de información geográfica, lo que permitió el correcto uso de las bandas de información térmica para obtener la temperatura superficial que se registró para los casos diurnos y nocturnos.

Con la información obtenida fue posible realizar un análisis de dispersión con las variables de temperatura superficial y con las capas de información del índice de vegetación normalizada (NDVI), lo que permitió establecer una relación entre las zonas donde se registraron ciertos grados de temperatura en contraste con el uso de suelo que se registró en el área; cabe resaltar que la información que se recolectó cuenta con una resolución baja, dado que cada pixel de información corresponde a 1 kilómetro cuadrado de superficie, por lo que existe un margen de incertidumbre que puede influenciar en los resultados.

Con las imágenes procesadas se realizó cartografía temática que permite dimensionar la distribución geoespacial de las temperaturas registradas para el caso diurno y nocturno.

A partir de los diagramas de dispersión y la cartografía realizada se logró identificar la presencia de una o varias Islas de Calor para cada temporada, mismas que se compararon con la presencia de asentamientos humanos en las zonas donde

predominan los rangos de temperatura superficial más elevada, a la vez que se observó el comportamiento que tenía la temperatura en áreas donde se conoce existen masas forestales que brindan servicios ecosistémicos como la regulación de la temperatura.

La hipótesis planteada al inicio del presente trabajo de investigación esperaba identificar la presencia de Islas de Calor en municipios como Toluca, Metepec, San Mateo Atenco, Lerma, Santiago Tianguistenco y Ocoyoacac, dada la presencia de zonas industriales y la alta concentración de población que presentan en algunas áreas de su territorio, sin embargo, a partir del análisis de resultados se encontró que uno de los municipios donde se presenta un rango de temperaturas superficiales más elevadas es Almoloya de Juárez.

Realizando una recapitulación del comportamiento de las Islas de Calor identificadas en el periodo 2018 – 2020, encontramos que durante el año 2018 el fenómeno se muestra en concordancia con la teoría, pues esta nos dice que los patrones de distribución de la temperatura se presentan en forma radial, con el centro de la ciudad como un foco de calor que va disminuyendo su magnitud conforme nos acercamos a la periferia.

Observamos que durante el Verano y Otoño de este año, la distribución espacial de las temperaturas concentra los rangos más elevados dentro de los municipios de Toluca, Metepec, San Mateo Atenco y la zona oeste de Lerma, territorios que albergan la mayor cantidad de desarrollos habitacionales, industrias y vías de comunicación que el resto de los municipios de la ZMVT, tomando esta concentración de temperatura superficial como referencia, observamos que la temperatura disminuye conforme se avanza hacia la periferia de la zona de estudio, hacia lugares donde es conocida la presencia de zonas forestales, cuerpos de agua y límites naturales en forma de montañas, sierras y volcanes.

Por el contrario, las temporadas de Primavera e Invierno de 2018 muestran una extensión mayor de las zonas donde se registraron temperaturas superficiales elevadas, dando pie a que puedan identificarse más de una isla de calor.

Para el caso del año 2019, se presenta más de una Isla de Calor en las cuatro estaciones, además de ser el año en que se registraron las temperaturas superficiales más elevadas de este estudio.

En general, el año 2020 representa un punto interesante de análisis, dadas las circunstancias sociales y sanitarias que se produjeron durante el mes de Marzo y que pueden tener influencia en la información que reportan las imágenes satelitales de este año.

En contraste, las temperaturas superficiales nocturnas de los tres años muestran concordancia con la teoría, pues se observa como las altas temperaturas se disipan con dificultad, situación que puede ser debida al almacenamiento de calor, el albedo y las propiedades térmicas de los materiales que componen la superficie.

Los diagramas de dispersión permiten entender que la vegetación o la ausencia de ella es una variable importante que considerar dentro del estudio de las Islas de Calor, sin embargo, existen otros factores que influyen en los patrones de distribución y comportamiento del fenómeno dentro de la zona de estudio, por lo que brindan la oportunidad de evaluar la influencia de otros factores que pudieran tener un efecto en la generación del fenómeno.

En resumen, se espera que los resultados del presente trabajo de investigación sean de utilidad para los diferentes sectores de la sociedad, al brindar un panorama del concepto Isla de Calor, los factores que propician el fenómeno y las consecuencias que este tiene en los diferentes ámbitos, pero primordialmente para la adecuación de programas gubernamentales que actualmente se desarrollan en la zona de estudio, tales como los planes de desarrollo, ordenamientos ecológicos, atlas de riesgo y planes de acción climática municipales; haciendo particular énfasis en el desarrollo sustentable de asentamientos humanos por parte de agencias de cooperación internacional con las que México se encuentra vinculado, aunado a la importancia que tiene el colaborar para evitar el aumento de la temperatura a nivel global.

Una herramienta que nos ayuda a entender el funcionamiento del ecosistema urbano, así como los desplazamientos de materia y energía que se producen entre este tipo de ecosistemas y sus alrededores es el metabolismo urbano, por lo que su aplicación en estudios ambientales es importante dada su capacidad de incluir diferentes aspectos del entorno y contextualizar de manera más amplia las interacciones que tiene una ciudad con su periferia y que están teniendo un impacto directo en sus conflictos ambientales.

Se observa la importancia del uso de sistemas de información geográfica para el estudio de temas ambientales, dado que pueden mostrar de manera clara la distribución geoespacial de los diferentes conflictos ambientales, a esto también se suma la importancia del uso de software libre en la realización de trabajos de investigación, dado que un programa de uso libre permite la difusión, replica y adaptación de metodologías para su aplicación en contextos diferentes.

Recomendaciones

El presente trabajo de investigación busca realizar un aporte a la contextualización y comprensión del tema de Islas de Calor dentro de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, sin embargo, el tema se presta para ser abordado desde otros puntos de vista y bajo diferentes variables, por lo que se realizan las siguientes recomendaciones.

- ∞ El presente trabajo de investigación se podría enriquecer a futuro, si se realiza un estudio complementario con las variables meteorológicas que utilizan las redes de Estaciones Meteorológicas Automáticas de CONAGUA y la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), con la finalidad de adicionar parámetros como la humedad, dirección y velocidad del viento.
- ∞ Se sugiere el abordar el tema de Islas de Calor desde perspectivas como el metabolismo urbano y la gobernanza, dado que el metabolismo urbano permite abordar la problemática desde una perspectiva holística, mientras que la gobernanza aporta un análisis de la situación desde la perspectiva de políticas públicas, actores sociales y su papel en la mitigación de este fenómeno.
- ∞ Es importante que la población se mantenga informada de los procesos y conflictos ambientales de su entorno, difundir la información sobre Islas de Calor y sus consecuencias podría resultar útil como una estrategia de educación ambiental.

Bibliografía

- Ahrens, D. C., 2011. *Essentials of Meteorology*. Tercera ed. Belmont: Wadsworth.
- Ahrens, D. C., Jackson, P. L. & Jackson, C., 2012. *Meteorology Today. An introduction to weather, climate and the environment*. Primera ed. Canadá: Nelson Education.
- Alcoforado, M. J. & Andrade, H., 2006. Nocturnal urban heat island in Lisbon (Portugal): main features and modelling attempts. *Theoretical and Applied Climatology*, Volume 84, pp. 151-159.
- Álvarez-López, A., 2004. Cambio Climático y microclimas urbanos en ciudades del centro de Cuba. Reflexiones para el planteamiento a través de SIG.. *ASADES*, 8(1), pp. 112 - 116.
- Andrades Rodríguez, M. & Muñoz León, C., 2012. Fundamentos de Climatología. In: *Material didactico: Agricultura y Alimentación*. La Rioja: Universidad de la Rioja, pp. 7 - 61.
- Arnfield, A. J., 2003. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, Volume 23, pp. 1-26.
- Ayllón, T., 2003. *Elementos de Meteorología y Climatología*. 2a. ed. México, D.F.: Trillas.
- Bolstad, P., 2016. *GIS Fundamentals: A First Text on Geographic Information Systems*. Fifth ed. Minnesota: XanEdu.
- Cámara de Diputados, 2015. *Boletín N°. 5693*. [Online] Available at: <http://www5.diputados.gob.mx/index.php/esl/Comunicacion/Boletines/2015/Junio/06/5693-Proponen-prevenir-y-regular-efectos-de-islas-de-calor-pueden-aumentar-defunciones-por-altas-temperaturas> [Accessed 5 Febrero 2021].
- Camilloni, I. A., 1995. *Tesis de Posgrado: Detección de la señal de la Isla Urbana de calor y de variaciones climáticas*. Buenos Aires: Univesidad de Buenos Aires.
- Casillas-Higuera, A., García-Cueto, R., Leyva-Camacho, O. & Gonzalez-Navarro, F. F., 2014. Detección de la Isla Urbana de Calor mediante Modelado Dinámico en Mexicali, B.C., México. *Información Tecnológica*, pp. 139 - 150.
- Centro Mario Molina, 2014. *Estudio del Sistema Integral de Movilidad Sustentable para el Valle de Toluca*. [Online] Available at: <https://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2015/01/Documento-de-difusi%C3%B3n-Movilidad-Sustentable-Toluca.pdf> [Accessed 22 Diciembre 2020].

- CEPANAF, n.d. *Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna, Decretos de la Áreas Naturales Protegidas*. [Online] Available at: http://cepanaf.edomex.gob.mx/decretos_areas_naturales_protegidas#collapseOne [Accessed Febrero 2021].
- Chakraborty, T. & Lee, X., 2019. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 74, pp. 269-280.
- Chang, H.-T., 2016. A temporal and spatial analysis of urban heat island in basin city utilizing remote sensing techniques. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLI-B2, pp. 165 - 170.
- Chang, K.-T., 2019. *Introduction to Geographic Information Systems*. Ninth ed. New York: McGraw Hill Education.
- Contreras-Cardosa, A., Salas-Plata-Mendoza, J. A., Velásquez-Angulo, G. & Quevedo-Urías, H., 2008. Determinación de la Isla de Calor Urbano en Ciudad Juárez mediante programa de cómputo. *Culcyt, Clima Urbano*, 5(25), pp. 3-16.
- Córdova-Sáez, K., 2011. Impactos de las islas térmicas o islas de calor urbano, en el ambiente y la salud humana. Análisis estacional comparativo.. *Terra Nueva Etapa*, XXVII(42), pp. 95-122.
- EPA, 2008. *United States Environmental Protection Agency (EPA)*. [Online] Available at: <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium> [Accessed 1 Marzo 2019].
- ESA, 2020. *European Space Agency*. [Online] Available at: <https://www.esa.int/> [Accessed 10 Diciembre 2020].
- ESA, 2020. *European Space Agency, Scientific Toolbox Exploitation Platform*. [Online] Available at: <https://step.esa.int/main/> [Accessed 10 Diciembre 2020].
- Fernández García, 1996. *Manual de Climatología Aplicada; Clima, Medio Ambiente y Planificación*. Primera ed. España: Síntesis.
- Fuentes-Pérez, C. A., 2014. Islas de calor urbano en Tampico, México. Impacto del microclima a la calidad del hábitat. *Nova Scientia*, 7(13), p. 495 – 515.
- García, E., 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Quinta ed. México: UNAM.

- Gartland, L., 2008. *Heat Islands. Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas*. Primera ed. Londres: Earthscan.
- Gómez Delgado, M. & Barredo Cano, J. I., 2005. *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Segunda ed. Madrid: Alfaomega.
- Hernández Sampieri, R., 2014. *Capítulo 7 Concepción o Elección del Diseño de Investigación*. 7 ed. México: McGraw Hill.
- Hernández-Godínez, T. Y., 2017. *Caracterización de los efectos de la isla de calor en la Delegación Venustiano Carranza, Ciudad de México*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Howard, L., 1833. *The Climate of London*. Volumen II ed. Irlanda: SATTAL.
- IGCEM, 2017. *Datos e indicadores de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca*. [Online] Available at: https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2017/8/3/3a5b1d2fb9a55cea32564f562f9848aa.pdf [Accessed 22 Diciembre 2020].
- INEGI, 2005. *Guía para la interpretación de cartografía climatológica*. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI, 2017. *Conjunto de datos vectoriales*, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI, 2017. *Marco Geoestadístico*, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI, 2020. *Instituto Nacional de Geografía y Estadística*. [Online] Available at: <http://www.inegi.org.mx/> [Accessed Febrero 2021].
- INEGI, 2020. *SIATL*. [Online] Available at: http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/# [Accessed Marzo 2021].
- Jáuregui-Ostos, E., 1979. La Isla de Calor en Toluca, Mex.. *Boletín - Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México*, pp. 27 - 37.
- Jáuregui-Ostos, E., 1992. La Isla de Calor Urbano de la Ciudad de México a finales del siglo XIX. *Boletín - Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México*, p. 31.
- Jáuregui-Ostos, E., 1995. Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización. *Boletín - Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México*, pp. 9 - 44.
- Jáuregui-Ostos, E., 2000. *El clima de la Ciudad de México*. Ciudad de México: Plaza y Valdez: Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México.

- Landsberg, H. E., 1981. *The Urban Climate*. First ed. New York: Academic Press.
- Landsberg, H. E. & Jacobs, W. C., 1951. Applied Climatology. In: T. F. Malone, ed. *Compendium of Meteorology*. Boston, MA: American Meteorological Society, pp. 976-992.
- Lokoshchenko, et al., 2015. *Vertical range of urban 'heat island' in Moscow*. Francia, International Conference on Urban Climate.
- Lowry, W., 1977. Empirical Estimation of Urban Effects on Climate: A Problem Analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 16(2), pp. 129 - 135.
- Manley, G., 1958. On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume 84, pp. 70-72.
- Martin-Vide, Sarricolea & Moreno-García, 2015. On the definition of urban heat island. *Frontiers in Earth Science*, 3(24).
- Meneses-Figueroa, T. Z. & Iral-Fiquitiva, P. A., 2017. *Análisis Espacio-Temporal de Variables que Inciden en la Generación de Isla de Calor Urbana en la Localidad de Kennedy*. Bogotá: Universidad de Santo Tomás.
- Mireles-Arellano, F., 2018. *Islas de Calor en la CDMX: Una perspectiva desde imágenes satelitales de percepción remota*, Ciudad de México: Instituto Politecnico Nacional.
- Morales-Méndez, C. C., Madrigal-Uribe, D. & González-Becerril, L. A., 2007. Isla de calor en Toluca, México. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3), pp. 307-316.
- Moreno-García, M. C., 1994. Intensity and form of the Urban heat island in Barcelona. *International Journal of Climatology*, Volume 14, pp. 705 - 710.
- Nagarajan, R., 2009. *Drought Assesment*. New Delhi, India: Springer.
- Oke, T. R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume 108, pp. 1-24.
- Oke, T. R., 1987. *Boundary Layer Climates*. Segunda ed. Londres: Taylor & Francis Group.
- Oke, T. R., 2006. Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, Volume 84, pp. 179-190.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. & Voogt, J. A., 2017. *Urban Climates*. 1 ed. Estados Unidos de America: Sheridan Books, Inc.
- OMM, 2011. *Guía de prácticas climatológicas*. s.l.:Organización Meteorológica Mundial .
- ONU Hábitat, 2020. *Folleto de datos poblacionales 2020*. [Online] Available at: <https://onuhabitat.org.mx/index.php/folleto-de-datos-poblacionales-2020>
- Rees, W. G., 2012. *Physical Principles of Remote Sensing*. Third ed. New York: Cambridge University Press.

- Rivera, E. et al., 2017. Spatiotemporal Analysis of the atmospheric and surface urban heat islands off the Metropolitan Area of Toluca, México. *Environ Earth*, 76(225).
- Rivera-Olmos, S. et al., 2011. Cambio Climático Global a través del tiempo geológico. *Investigación Universitaria Multidisciplinaria*, Issue 10, pp. 114-122.
- Rodríguez Jiménez, R. M., Benito Capa, Á. & Potela Lozano, A., 2004. *Meteorología y Climatología*. España: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología.
- Romero Dávila, S., Morales Méndez, C. C. & Antonio Némiga, X., 2011. Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México. *Revista de Climatología*, Volume 11, pp. 1 - 10.
- Sánchez Rodríguez, R., 2013. *Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Sangines Coral, D. E., 2013. *Metodología de evaluación de la Isla de Calor Urbana y su utilización para identificar problemáticas energéticas y de planificación urbana*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- Sarricolea Espinoza, 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*, Volume 57, pp. 123 - 141.
- Schanda, E., 1986. *Physical Fundamentals of Remote Sensing*. Third ed. Berlin: Springer-Verlag.
- SDP y UNC, 2015. *Gobierno de Colombia, Secretaría Distrital de Planeación*. [Online]
Available at: http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/guia_urbano-1.pdf
[Accessed 5 Febrero 2021].
- Secretaría de Economía, 2013. *Norma Mexicana AA-164-SCFI*. Secretaría de Economía: Disponible en:
<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/DO3156.pdf>.
- Secretaría de Economía, 2016. *Información Económica y Estatal*. [Online]
Available at:
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/115990/estado_de_mexico.pdf
[Accessed 5 Febrero 2021].
- SEGOB, 2018. *Diario Oficial de la Federación. Aviso de consulta pública del Proyecto de Norma Mexicana PROY-NMX-C-7730-ONNCCE-2017..* [Online]
Available at:
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5518364&fecha=09/04/2018
[Accessed 5 Febrero 2021].

- Servicio Meteorológico Nacional, 2008. *Estaciones Meteorológicas Automáticas*.
[Online]
Available at: <https://smn.cna.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>
[Accessed 2018].
- Smith & Smith, 2007. *Ecología*. Sexta ed. Madrid: Pearson.
- Soberón-Forsberg, V. S. & Obregón-Párraga, E., 2016. Identificación de Islas de Calor en la Ciudad de Lima Metropolitana utilizando imágenes del satélite Landsat 5TM. *Anales Científicos*, 77(1), pp. 34 - 44.
- Tejeda-Martínez, A. & Acevedo-Rojas, F., 1990. Alteraciones climáticas por la urbanización en Xalapa, Ver.. *La Ciencia y el Hombre*, Issue 6, pp. 37-48.
- Van Hove, et al., 2011. *Exploring the Urban Heat Island Intensity of Dutch Cities*. Wageningen: Wageningen University and Alterra Report.
- Villanueva-Solís, J., Ranfla, A. & Quintanilla-Montoya, A. L., 2013. Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo. *Información Tecnológica*, 24(1), pp. 15 - 24.
- Yeh, M.-L. et al., 2014. A Study on the Influences of Urban Heat Island Effect on Industrial Development and its Contributing Factors. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(12), pp. 183 - 194.