



Universidad Autónoma del Estado de México



Facultad de Química

Tesis

Islas de Calor y su relación con los servicios ecosistémicos de regulación climática. El caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca.

Presenta

L.G.I. Jenny Lizeth Flores Zúñiga

Dirigido por:

Tutor académico

Dr. Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo

Tutor adjunto

Dr. Carlos Alberto Pérez Ramírez

Noviembre 2023

Contenido

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	7
Planteamiento del Problema	8
Justificación	10
Hipótesis	11
Objetivo General	11
CAPITULO 1. MARCO TEORICO	12
1.1 Ciencias Ambientales	12
1.2 Sustentabilidad	14
1.3 Desarrollo y calidad de vida	17
1.4 Áreas verdes urbanas	19
1.5 Calentamiento global	21
1.5.1 Islas de calor urbanas y su impacto sobre el bienestar humano	23
1.6 Experiencias metodológicas en el estudio de islas de calor y áreas verdes urbanas	25
1.6.1 Intensidad islas de calor urbanas superficiales (ICU)	29
1.6.1 Análisis del Enfoque de Marco Lógico	35
CAPITULO 2. METODOLOGÍA	36
2.1 Caracterizar la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca Mediante el Método Geográfico y Ambiental.	36
2.2 Ubicar y cuantificar las islas de calor, calcular el Índice de Varianza del Campo Térmico Urbano y calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para el año 2020 con imágenes de satélite en la ZMCT	38
2.2.1 Ubicar y cuantificar las islas de calor	38
2.2.2 Ubicación y cuantificación del Índice de Varianza del Campo Térmico Urbano (UTFVI) en el año 2020.	42
2.2.3 Calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para el año 2020	43
2.3 Determinar la relación de las islas de calor con los Servicios Ecosistémicos de regulación climática: Captura de carbono, Reducción de ruido, Enfriamiento y Recreación, mediante indicadores de Servicios Ecosistémicos.	44
2.3.1 Análisis cualitativo y cartográfico de la captura de carbono, reducción de ruido, enfriamiento y recreación.	45
2.3.2 Análisis cuantitativo y comparativo de la captura de carbono, reducción de ruido, enfriamiento y recreación.	47

2.4 Planificación de estrategias para la mitigación de islas de calor en la ZMCT y mejoramiento del bienestar humano	48
2.4.1 Método de Análisis bajo el Enfoque del Marco Lógico (EML).....	48
2.4.2 Generación de propuesta para la mitigación de las islas de calor en la ZMCT y mejoramiento del bienestar humano	50
CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
3.1 Caracterización geográfica y ambiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca	51
3.1.1 Aspectos Físico-Bióticos.....	52
3.1.2 Características Sociales.....	57
3.2 Ubicación y cuantificación de las islas de calor y cálculo del Índice de Varianza del Campo Térmico Urbano o índice de confort climático el que ocurren en la ZMCT en el año 2020.....	66
3.2.1 Ubicación y cuantificación de las islas de calor 2020.	66
3.2.2 Ubicación y cuantificación del Índice de Varianza del Campo Térmico Urbano (UTFVI) en el año 2020.....	77
3.2.3 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en la ZMCT durante el 2020.....	86
3.3 Servicios Ecosistémicos de regulación climática: Captura de carbono, Reducción de ruido, Enfriamiento y Recreación en la ZMCT.....	95
3.3.1 Análisis espacial de los Servicios Ecosistémicos (SE) de regulación climática (captura de carbono, reducción de ruido, enfriamiento y recreación) en las cuatro estaciones del año 2020.	95
3.3.2 Análisis cuantitativo de los Servicios Ecosistémicos (SE) de regulación climática (captura de carbono, reducción de ruido, enfriamiento y recreación) en las cuatro estaciones del 2020.....	112
3.3.3 Análisis comparativo de los Servicios Ecosistémicos (SE) de regulación climática (captura de carbono, reducción de ruido, enfriamiento y recreación) en las cuatro estaciones del año 2020.	116
3.4 Propuesta de estrategias para la mitigación de Islas de Calor Urbanas.	120
3.4.1 Análisis FODA.....	120
3.4.2 Análisis de estrategias FODA.....	121
3.4.3 Análisis bajo el Enfoque de Marco Lógico.....	122
3.4.4 Árbol de problemas.....	125
3.4.5 Árbol de objetivos.....	126
3.4.6 Análisis de alternativas	127
3.4.7 Evaluación cualitativa y cuantitativa de las alternativas.....	128

3.4.8 Matriz de Indicadores para Resultados (MIR)	130
3.5 Discusión General	134
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	137
REFERENCIAS	138
ANEXO FOTOGRÁFICO	145

RESUMEN

La Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca ubicada al centro de México, en las últimas décadas ha aumentado su superficie de uso urbano e industrial, además de atravesar diversas modificaciones dentro de su infraestructura verde urbana, además de factores antropogénicos y físicos que favorecen la formación de un fenómeno conocido como “isla de calor urbana” (ICU).

En la presente investigación se evaluó la relación de las islas de calor con los servicios ecosistémicos de regulación climática en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca (ZMCT) para el año 2020. Se consideró crucial estudiar este fenómeno porque implica riesgos importantes a la salud y bienestar de los residentes de la ZMCT.

La metodología consistió en elaborar una caracterización geográfica y ambiental de la ZMCT, después se identificó la intensidad de islas de calor urbanas superficiales (SUHII), el Índice de Varianza Térmico Urbano (UTFVI) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) mediante imágenes satelitales Landsat-8. Con estos resultados, se analizó la estacionalidad de cada variable durante año 2020 para identificar los patrones de las islas de calor de forma puntual sobre las imágenes y se hizo un recorrido en campo que permitió observar las características en los sitios que presentaron mayores intensidades.

A posteriori, los servicios ecosistémicos de regulación climática se calcularon mediante una descripción cualitativa (categorías) y cuantitativa (superficie), para poder identificar a través de las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) el nivel de contribución de captura de carbono, reducción de ruido, recreación y enfriamiento sobre la ZMCT.

Finalmente, se proponen medidas de mitigación de acuerdo con el Análisis del Enfoque de Marco Lógico para favorecer la resiliencia de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca sobre las islas de calor urbanas y los servicios ecosistémicos con base en espacios verdes urbanos. Se mide la viabilidad de esta propuesta con una matriz de planificación de proyecto, análisis FODA, árbol de problemas, objetivos y Matriz de Indicadores para Resultados (MIR).

Palabras clave: islas de calor urbanas, servicios ecosistémicos de regulación, Análisis del Enfoque de Marco Lógico

ABSTRACT

The Metropolitan Zone of Toluca City located in central Mexico, in recent decades has increased its urban and industrial use surface, in addition to undergoing various modifications within its urban green infrastructure, in addition to anthropogenic and physical factors that favour the formation of a phenomenon known as "urban heat island" (UHI).

In the present research, the relationship of heat islands with the ecosystem services of climate regulation in the Metropolitan Zone of the City of Toluca (ZMCT) for the year 2020 was evaluated. It was considered crucial to study this phenomenon because it implies important risks to the health and well-being of the residents of the ZMCT.

The methodology consisted in elaborating a geographical and environmental characterisation of the ZMCT, then the intensity of surface urban heat islands (SUHII), the Urban Thermal Variance Index (UTFVI) and the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) were identified using Landsat-8 satellite images. With these results, the seasonality of each variable during the year 2020 was analysed to identify the patterns of heat islands in a punctual way on the images and a field tour was carried out to observe the characteristics in the sites with the highest intensities.

Subsequently, the ecosystem services of climate regulation were calculated by means of a qualitative (categories) and quantitative (surface) description, in order to identify through the Basic Geostatistical Areas (AGEB) the level of contribution of carbon sequestration, noise reduction, recreation and cooling over the MCZT.

Finally, mitigation measures are proposed according to the Logical Framework Approach Analysis to favour the resilience of the Metropolitan Zone of the City of Toluca on urban heat islands and ecosystem services based on urban green spaces. The feasibility of this proposal is measured with a project planning matrix, SWOT analysis, problem tree, objectives and Indicator Matrix for Results (MIR).

Keywords: urban heat islands, regulating ecosystem services, Logical Framework Approach Analysis.

INTRODUCCIÓN

La Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca (ZMCT) es un conglomerado urbano que, en el año 2000 (INEGI) se conformaba por 38 localidades las cuales en su momento compartieron los seis municipios de Toluca, Metepec, Zinacantepec, San Mateo Atenco, Almoloya de Juárez y Lerma. Sin embargo, debido a que este estudio contempló la espacialidad del año 2020, es notable el crecimiento de la mancha urbana de la ZMCT respecto al año 2000, de tal forma que abarcó más municipios, al quedar conformada finalmente por: Almoloya de Juárez, Calimaya, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Oztolotepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec. Esta delimitación se basa en la propuesta por Hernández (2020) y está integrada por 86 localidades para el año 2020.

Respecto al análisis de antecedentes sobre diversos estudios locales, se identificó que este fenómeno ha evolucionado a lo largo de los años, aumentando la intensidad y la extensión de las islas de calor. Estas islas de calor pueden tener efectos negativos sobre el clima, la salud y el medio ambiente, por lo que se requieren acciones para mitigarlas y adaptarse a ellas. Debido a que no se encontraron estudios previos que relacionaran las islas de calor urbanas con los servicios ecosistémicos de regulación climática, se establecieron las bases de la presente investigación desde una amplia aplicación metodológica.

En el cumplimiento del objetivo general (Evaluar la relación de las islas de calor con los servicios ecosistémicos de regulación climática, en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca en el año 2020 mediante técnicas de percepción remota con la finalidad de identificar las variaciones en las cuatro estaciones) se plantearon y desarrollaron tres capítulos. En el primero, se describe el marco teórico conceptual que incluye experiencias metodológicas locales e internacionales para poder aplicar en islas de calor urbanas superficiales y servicios ecosistémicos de regulación climática. En el segundo capítulo se describen los procedimientos dentro de las cuatro etapas metodológicas.

En el tercer capítulo se exponen los resultados de la investigación, mismos que permitieron generar conclusiones y recomendaciones sobre el fenómeno de las islas de calor urbanas desde las Ciencias Ambientales.

Planteamiento del Problema

La Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca presenta gran actividad dentro de la industria y los servicios; los medios de transporte, las fábricas y centros comerciales emiten contaminantes por combustión, además de utilizar aires acondicionados para mantener frescas sus instalaciones. Si se suman a estos factores la inercia térmica por la densidad de construcción se forma el efecto de isla de calor urbana, que tiende a permanecer por largos periodos de tiempo y puede generar efectos negativos en el bienestar de la población.

De acuerdo con la Red de Monitoreo Atmosférico se ha visto una mala calidad de aire en los últimos años que representa peligros para el ser humano por el tamaño de las partículas y su composición química. Esto hace necesario recuperar la capacidad de los servicios ecosistémicos de captura de carbono y regulación de temperatura que se ha visto disminuida debido a la reducción de vegetación.

Las ZMCT presenta grandes retos en materia de planeación urbana, ya que tiene normas específicas en los materiales de construcción y su distribución de espacios para el desarrollo del hombre, lo cual genera en la mayoría de las ocasiones que estos materiales guarden ese calor (valor de albedo bajo) en vez de reflejarlo, este efecto genera una sensación de calor cada vez más frecuente.

Para estudiar la diferencia entre temperaturas de las ICU se debe partir de que algunas de ellas están relacionadas a que las ciudades están densamente construidas (cambio de uso de suelo), el suelo de concreto (materiales de hormigón, asfálticos, y oscuros), pocas áreas verdes (o deforestación) y el grado de disponibilidad de agua, lo cual favorece que la radiación solar se disperse más lentamente sobre la superficie urbana, efecto que se genera durante varias horas.

Dentro de los SEU de regulación climática y captura de carbono, los árboles son los mejores entes para regular la evapotranspiración, porque a través de estomas (pequeños poros localizados en la superficie de las hojas) sale vapor de agua y entra bióxido de carbono (CO₂), formándose así un flujo regulado de vapor de agua.

Preguntas de investigación

- 1.- ¿Cómo son las características geográficas donde se presenta el fenómeno de la isla de calor urbana superficial?
- 2.- ¿En qué sitios prevalece la presencia de las islas de calor urbanas superficiales en las cuatro estaciones?
- 3.- ¿Cuál es la relación entre las islas de calor con los servicios ecosistémicos de regulación climática?
- 4.- ¿Qué estrategias pueden mitigar el efecto de la isla de calor?

Justificación

La Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca por su ubicación estratégica para las actividades comerciales y servicios, presenta un desarrollo industrial y crecimiento urbanos que van en aumento. Toda esta actividad y disminución de espacios verdes provoca el efecto de Isla de Calor Urbana, por otro lado, también se ha reportado una mala calidad de aire en la zona, generada por este efecto.

Un aspecto importante para considerar es el de la salud humana, ya que las islas de calor pueden agudizar a las olas de calor. Este aumento de temperatura sumado a las partículas contaminantes contribuye al aumento de muertes relacionadas con problemas cardiovasculares y respiratorios, donde las personas mayores son las más vulnerables.

Las características del tema que se pretende abordar requieren de la utilización de tecnologías como la percepción remota que permite realizar estudios en grandes extensiones del territorio por su resolución espacial, temporal y espectral. De esta manera, se podrá entender el comportamiento de las islas de calor en relación con las áreas verdes urbanas para poder analizar posteriormente la relación de las primeras con los servicios ecosistémicos de regulación climática.

Entender el comportamiento de la variación espacial y temporal de las islas de calor dentro de la ZMCT comprende el análisis de un ciclo complejo de causa-efecto-cause que permitirá anticiparse a escenarios futuros de riesgos climáticos en ambientes menos resilientes/adaptativos de escala local a global.

La relevancia de estudiar islas de calor urbanas radica en que permite obtener información para proponer estrategias de mitigación ad hoc a las necesidades y características que se logren identificar en la zona de estudio. También el hecho de analizarlas de forma estacional permite encontrar tendencias en los patrones de la temperatura superficial sobre la cobertura vegetal urbana, lo cual se realizó en cuatro estaciones del año 2020.

Hipótesis

Las islas de calor superficiales se relacionan con los servicios ecosistémicos de regulación climática.

Objetivo General

Evaluar la relación de los servicios ecosistémicos con las islas de calor en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca en el año 2020; y así representar su evolución, mediante los métodos climático, cartográfico, estadístico, SIG y sensores remotos.

Objetivos Específicos

- 1.- Construir el marco teórico sobre las Ciencias Ambientales, islas de calor urbanas y servicios ecosistémicos de regulación.
- 2.- Evaluar la relación de las islas de calor con los servicios ecosistémicos de regulación climática, en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca en el año 2020 mediante técnicas de percepción remota con la finalidad de identificar variaciones en las cuatro estaciones.
- 3.- Identificar las islas de calor, calcular la vulnerabilidad mediante el Índice de Varianza del Campo Térmico Urbano y calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.
- 4.- Determinar la relación de las islas de calor con los servicios ecosistémicos de regulación climática.
- 5.- Proponer estrategias para la mitigación de islas de calor urbanas.

CAPITULO 1. MARCO TEORICO

1.1 Ciencias Ambientales

La epistemología ambiental ayuda a dilucidar las interacciones que convergen en las ciencias ambientales como aquellos diferentes modos de producción del conocimiento, (González citado en Morales, 2017) donde se encuentran: la naturaleza humana, la naturaleza no antrópica, las ciencias y las humanidades. Cuyo objetivo es el desarrollo de sistemas socio-ecológicos que puedan garantizar la armonía entre las actividades humanas y el ambiente.

Una definición holística de las ciencias ambientales planteada por Gianuzzo (2010) las define como “el conjunto de conocimientos y metodologías, provenientes de diferentes disciplinas, integrados con el objeto de comprender, predecir y accionar sobre las interrelaciones de las poblaciones humanas en su devenir histórico, social, cultural y tecnológico con la naturaleza y su evolución dinámica intrínseca”.

Las ciencias ambientales están vinculadas con los procesos de la vida en cualquiera de sus formas, estas a su vez estudian las complejas relaciones que se dan día a día de forma positiva o negativa entre los procesos físicos y biológicos sobre la Tierra a través de un ejercicio interdisciplinario -con una concepción holística de la realidad- donde convergen las Ciencias de la Tierra, la Física, la Química, la Biología, la Ingeniería, así como en el campo de las disciplinas sociales como la Economía y la Demografía Gianuzzo (2010).

De forma general, las ciencias ambientales estudian y abarcan todos los campos de las ciencias naturales. Históricamente, los científicos ambientales se han enfocado principalmente en el ambiente natural, el cual comprende la atmósfera, la tierra, el agua y su población, para poder diferenciarlo del ambiente antropogénico. (Mackenzie y Susan, 2004)

Mackenzie y Susan (2004) consideran la vertiente de los estudios ambientales de acuerdo con una lógica cuantitativa y cualitativa para poder describir adecuadamente los fenómenos identificados. Cuando los datos y las generalizaciones son cuantitativos se requiere de elementos matemáticos para expresar una teoría que explique las relaciones cuantitativas. Mientras que la lógica cualitativa es descriptiva, con la que se busca explicar, predecir, describir o explorar el “por qué” de un problema dado.

En la época moderna de las ciencias ambientales que compete a mediados del siglo XX, Rachel Carson -bióloga marina- en su obra “La Primavera Silenciosa” (1962), denunció los peligros del uso de pesticidas en la salud humana, además de la flora y fauna. Es entonces donde la necesidad de entender los efectos contaminantes en el agua, el aire, suelo, vegetación, todo lo que conlleva el ambiente, se hizo más evidente.

Es así como a mediados de la década de 1970 la ciencia ambiental se logró establecer con firmeza en la academia, y para el año de 1980 emergieron las subdisciplinas reconocidas tales como: química ambiental, biología ambiental, entre otras. Las cuales se caracterizaron a través de las anteriores disciplinas que fueron parte de las ciencias naturales. (Mackenzie y Susan, 2004)

La necesidad del uso equitativo, ético y sustentable de los recursos disponibles en la Tierra por parte de los seres humanos que cada vez más se acerca a la capacidad de carga del planeta, nos lleva a intentar comprender las afectaciones de la población al medio ambiente y los principios científicos que rigen aquellas interacciones entre el mundo biótico y no biótico. La capacidad de comprender y evaluar los argumentos que se basen en evidencia sobre las problemáticas ambientales derivadas de las acciones antropogénicas y las decisiones tomadas con base en, tendrán una evidente influencia sobre el futuro. (Fisher, 2023)

Dentro del contexto mexicano, se promulgó La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en 1988 como la máxima ley del derecho ambiental, esta definió al ambiente como “El conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados.”

En este sentido, ante las problemáticas que generaron la falta de valor ecológico y socioeconómico hacia los ecosistemas, motivaron la inserción de la variable ambiental en las políticas y planes de desarrollo orientados al enfoque entre la compatibilidad de la conservación y aprovechamiento de los recursos naturales para las presentes y futuras generaciones.

1.2 Sustentabilidad

El concepto de sustentabilidad surge como respuesta ante la concientización de que habitamos un planeta que tiene recursos naturales limitados, una población cada vez más difícil de abastecer, el desarrollo económico y tecnológico, estos últimos con consecuencias contaminantes. El planeta cuenta con una capacidad límite de sustentación, donde nos acercamos cada vez más a ese colapso debido a la alteración climática que se ha hecho presente en los últimos años (Zarta, 2018).

El principio de la sustentabilidad ambiental exige que el desarrollo sea compatible con el mantenimiento de los procesos ecológicos, la diversidad biológica y la base de los recursos naturales, en estos se remarca la complejidad de fenómenos y la variedad de relaciones que involucra, como, por ejemplo, la supervivencia de millones de especies vivas en el planeta (así como también la desaparición de otras tantas) y su relación con los ecosistemas de la naturaleza y de éstos con la sociedad. (Durán, 2010; Zarta, 2018)

Dimensión ecológica o ambiental: Esta dimensión se refiere al cuidado y la conservación de los recursos naturales y los ecosistemas que sostienen la vida en el planeta. Implica evitar el impacto negativo del desarrollo humano sobre el ambiente, manteniendo el equilibrio ecológico y la biodiversidad. Según la obra *La primavera silenciosa* de Rachel Carson, publicada en 1962, esta dimensión fue la que motivó el surgimiento de la teoría de la sustentabilidad, al evidenciar las graves consecuencias del desarrollo industrial sobre el medio ambiente (Castro, 2020).

La dimensión ambiental de la sustentabilidad constituye el potencial básico del desarrollo territorial, pues está condicionada por la provisión de recursos naturales y de servicios ambientales de un espacio geográfico. Por ello es importante incorporar esta dimensión en la toma de decisiones políticas y examinar las consecuencias ambientales que cada sociedad promueve -mediante el consumo- en las distintas etapas de la historia.

Dimensión económica: Esta dimensión se relaciona con la generación de riqueza y bienestar material para las personas, mediante el uso eficiente y responsable de los recursos disponibles. Implica promover un crecimiento económico que sea compatible con la preservación ambiental y la equidad social, evitando el despilfarro y la explotación (Achkar et al., 2005). Según el esquema de la economía sostenible propuesto por Cervantes (de la

Peña, 2004) esta dimensión se basa en tres principios: la eficiencia, la circularidad y la inclusión.

Dimensión social: Esta dimensión se refiere al respeto y la garantía de los derechos humanos, la justicia y la participación ciudadana en el desarrollo. Implica fomentar la cohesión social, la diversidad cultural, la educación y la salud para todas las personas, reduciendo las brechas de desigualdad y pobreza. Según el Premio Nobel de la Paz Muhammad Yunus, esta dimensión se puede impulsar mediante el emprendimiento social, que busca contribuir y cambiar el mundo más que solo hacer dinero (RedPolítica, s.f.).

Dimensión cultural: Esta dimensión se refiere al reconocimiento y la valoración de las diferentes expresiones culturales de las sociedades humanas, que inciden en su forma de entender y relacionarse con el desarrollo. Implica promover el diálogo intercultural, el respeto a la identidad y la diversidad, y la protección del patrimonio cultural. Según el Dalai Lama, esta dimensión implica asumir un sentido de responsabilidad universal, no solo entre naciones y entre humanos, sino entre humanos y cualquier otra forma de vida (Durán, 2010).

El tiempo es otra de las dimensiones de la sustentabilidad, pues este vincula una correlación significativa entre los seres humanos con el tiempo y la existencia de problemas para las generaciones futuras, entre más rápido se puedan resolver las diversas problemáticas, se permite a los ecosistemas recuperar su capacidad de provisión o carga.

México abordó la sustentabilidad ambiental -en un sentido de equidad intergeneracional- en su Plan Nacional de Desarrollo (PND 2007-2012) como “la administración eficiente y racional de los recursos naturales para mejorar el bienestar de la población actual sin comprometer la calidad de vida de las generaciones futuras”, entre los objetivos a destacar está la participación responsable de los ciudadanos, para el cuidado, la protección, preservación y aprovechamiento racional de la riqueza del país.

De acuerdo con Casas et al. (2017), es de vital importancia tomar en consideración la ciencia para la sustentabilidad, -un campo de investigación- que surge de reconocer las limitaciones que se presentan en ciertos enfoques científicos y tecnológicos tradicionales de la época contemporánea, los cuales tienen por objetivo la generación estrategias y comprensión de la crisis ambiental global.

Los principales aspectos que aborda de la ciencia para la sustentabilidad se encuentran:

- 1) querer visualizar y comprender cómo interactúa la natura y la sociedad bajo la visión integrativa de procesos socioecológicos que influyen entre sí;
- 2) reconocer estos procesos como fenómenos sistémicos con complejidades para entender los componentes y las propiedades que caracterizan a tales sistemas, para poder comprender a la sustentabilidad como un proceso en constante cambio y que se construye continuamente;
- 3) comprender a los sistemas socio ecológicos en diferentes escalas, tanto locales, regionales como globales y las influencias la comprensión de los sistemas socio ecológicos a escalas locales, regionales y globales y las mutuas influencias entre estos;
- 4) necesidad de desarrollo e implementación de estrategias con enfoque en investigación multidisciplinar, interdisciplinar y transdisciplinar, de tal forma que puedan generar interacciones entre distintos campos de la investigación científica donde se puedan analizar los problemas ambientales desde diferentes ángulos, y
- 5) es importante poder establecer las bases institucionales que permitan compartimentar los saberes y experiencias de lo interdisciplinario y multisectorial sobre problemáticas ambientales, para poder identificar las mejores estrategias de solución o mitigación (Casas et al., 2017).

Las ciudades enfrentan desafíos de sustentabilidad, por lo que la generación de información ambiental para monitoreo de fenómenos urbanos tomando como base las evidencias de los problemas ambientales. Para una adecuada gestión urbana, los modelos de indicadores pueden transformar información en conocimiento social y en la gestión urbana logran proporcionar información valiosa para conocer el estado de un municipio (Karis, Mujica y Ferraro, 2019).

1.3 Desarrollo y calidad de vida

El concepto de desarrollo sustentable se hizo conocido mundialmente a partir del informe Brundtland “Nuestro Futuro Común”, publicado 1987 (Grandón, 2006). En este informe se plantea la posibilidad de obtener un desarrollo económico basado en políticas de sostenibilidad. Aunque estos objetivos están condicionados por las acciones políticas que permitan el adecuado manejo de los recursos del ambiente y así se garantice el progreso humano de forma sostenible y la supervivencia del hombre en el planeta.

Álvarez et al. (2015) afirman que el desarrollo sustentable implica pasar de un desarrollo pensado en términos cuantitativos a uno de tipo cualitativo donde se toman en cuenta las dimensiones educativas, culturales, económicas, sociales y ambientales. Cabe mencionar que, dentro de los paradigmas de desarrollo, está el de cambios estructurales de tipo culturales que planteó Gligo (2001) donde menciona que no se puede lograr avances desde el hombre mismo hasta los siguientes niveles de organización sin un cambio cultural.

En cuanto a calidad de vida se refiere, actualmente una gran cantidad de personas que viven en países en desarrollo no tienen satisfechas sus necesidades básicas, la pobreza es una situación común, no hay oportunidades de poder mejorar sus condiciones de vida. Por consecuencia, esta situación vuelve al mundo propenso de sufrir crisis humanitarias, económicas y ambientales que interfieren con el desarrollo. (Damián, 2015)

La orientación a una mejor calidad de vida del desarrollo sustentable se basa en superar la pobreza, satisfacer las necesidades básicas humanas y mejorar los ingresos, donde se reasignan recursos económicos para implementar planes y políticas destinados a la atención de estas necesidades.

De acuerdo con Hernández (2009) la calidad de nuestro ambiente es básica para la satisfacción del ciudadano, donde no es posible intercambiar la calidad ambiental del aire que respiramos con algún valor económico pues ejemplifica cómo los entornos de ciudades industriales propiciaron la degradación de las condiciones de vida, por lo que los beneficios de un crecimiento económico no bastaron para satisfacer las necesidades del ciudadano.

Entre los objetivos de desarrollo sostenible del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2021) que se relacionan con el tema de investigación, se encuentran de tres tipos:

11) ciudades y comunidades sostenibles, 13) acción por el clima y 15) vida de ecosistemas terrestres. El primero identifica que para mejorar la seguridad y la sostenibilidad de las ciudades implica el garantizar el acceso a viviendas seguras y asequibles y el mejoramiento de los asentamientos marginales. También incluye realizar inversiones en transporte público, crear áreas públicas verdes y mejorar la planificación y gestión urbana de manera que sea participativa e inclusiva. (Bermúdez, 2020)

El objetivo de acción por el clima que también se acordó en los Acuerdos de París (2015) menciona la problemática que se presenta ante las pérdidas económicas derivadas por los efectos del clima, mismas que alcanzan cientos de miles de millones de dólares, además de las pérdidas humanas, donde el 91 por ciento de las cuales son relacionadas al clima, y que entre 1998 y 2017 tomaron la vida de 1,3 millones de personas, y dejaron a 4.400 millones heridas. El objetivo buscó movilizar US\$ 100.000 millones anualmente hasta 2020, con el fin de abordar las necesidades de los países en desarrollo en cuanto a adaptación al cambio climático e inversión en el desarrollo bajo en carbono, además de limitar el aumento de la temperatura media global a dos grados Celsius por encima de los niveles preindustriales, apuntando a 1,5°C. (UNDP, 2021)

El objetivo sobre la vida de los ecosistemas terrestres destaca la presencia de bosques como fuentes de aire limpio y agua además de mitigadores ante el cambio climático, pues las soluciones climáticas basadas en la naturaleza pueden contribuir a alrededor de un tercio de las reducciones de CO2 necesarias para 2030 y el valor de los ecosistemas para los medios de vida y el bienestar de las personas es de US\$ 125 billones por año. También busca movilizar recursos considerables de todas las fuentes y a todos los niveles para financiar la gestión forestal sostenible y proporcionar incentivos adecuados a los países en desarrollo para que promuevan dicha gestión, en particular con miras a la conservación y la reforestación. En este sentido, es indispensable que se empleen recursos para la reforestación de espacios verdes urbanos, así como de infraestructuras urbanas eficientes que permitirán obtener una mejor calidad de vida. (UN, 2021)

1.4 Áreas verdes urbanas

Las dinámicas de desarrollo urbanas en las ciudades de México han visto un crecimiento exponencial sin un marco regulatorio bien definido en cuanto a la estructura e implementación de espacios/infraestructuras verdes en su planeación y manejo, pues el enfoque principal es el de la construcción para diferentes usos y acceso a los servicios básicos. Incluso los espacios destinados a los jardines y áreas de uso común llegan a ser olvidados para actos de vandalismo. Otros cambian de acuerdo con los objetivos de las administraciones públicas en turno.

El concepto de áreas verdes urbanas puntualiza en que se reconoce que éstas pueden y deben ser utilizadas de forma integrada y holística, de las que se pueden obtener otros beneficios sociales y ambientales, independientemente del uso recreativo o estético que tengan (Sorensen et al., 1998).

La importancia de la calidad de espacios verdes con frondoso arbolado radica en su papel imprescindible en la conformación de la ciudad, en cómo mejora la percepción ambiental urbana y la calidad de vida del habitante al resultar beneficiado de estos espacios, los cuales se han encontrado presentes en las ciudades desde la fundación de estas, ocupando significativos referentes como los parques urbanos y la ciudad jardín. (Rendón, 2010)

Corral, B. (1989) identifica lineamientos de espacios verdes para obtener índices de confort de acuerdo con el tipo de clima que son: 1) en el clima frío los árboles rompen vientos; 2) en clima templado los árboles verdes protegen vientos y de hoja caduca para proporcionar sombras; 3) en clima cálido seco la vegetación absorbe la radiación de superficie, con propiedades evaporativas y de sombreado y 4) en clima cálido húmedo árboles de sombra con ramas altas para no interferir los vientos.

El adecuado manejo de áreas verdes urbanas es una estrategia que permite a nuestras ciudades tener ambientes más adecuados para la salud, caracterizarse por ser más habitables, placenteras y sostenibles.

En relación con el término ecosistema, se entiende como la unidad funcional básica de la naturaleza donde interactúan componentes bióticos (plantas, animales, microorganismos), abióticos (energía, agua, suelos, nutrientes, atmósfera) y antrópicos que corresponden a las sociedades humanas como sistemas complejos. (Balvanera y Cotler, 2011)

Szumacher y Malinowska (2013) mencionan que, dentro de las ciencias naturales, la ciudad es considerada como un único ecosistema abierto o como un mosaico de ecosistemas estructurados según un sistema jerarquizado de elementos abióticos y bióticos, muy cercano al de los sistemas naturales y en el cual se produce circulación de materia y energía.

Inostroza et al. (2020) citan la definición de servicios ecosistémicos como aquellos beneficios que recibe la sociedad por el buen funcionamiento de ecosistemas sanos y resilientes. El marco conceptual del *Millenium Ecosystem Assessment* (2005) proporciona la clasificación más aceptada de los servicios ecológicos en cuatro categorías: servicios de sustento, servicios de regulación, servicios de provisión y servicios culturales.

Vásquez, (2016) considera la evaluación concreta de tres servicios ecosistémicos de infraestructura verde en zonas urbanas que son: (1) efecto enfriador; (2) rutas para transporte no motorizado; y (3) mitigación de inundaciones, por la resiliencia que representan ante el cambio climático.

Las áreas verdes cumplen con la función de ser los pulmones en las zonas urbanas, esto distingue a los espacios verdes en las ciudades como uno de los cinco indicadores principales para lograr la sostenibilidad de las ciudades, puesto que prometen diferentes beneficios sociales y ecológicos, estos están asociados a la calidad ambiental como un factor de calidad de vida, ya que no sólo cumplen con una función ornamental, sino que, contribuyen a optimizar la calidad del aire correspondiente a una importante cantidad de dióxido de carbono. Por lo cual, pasa a tener un papel de moderador de intercambio de aire, calor y humedad en dicho contexto urbano. (Rendón, 2010)

1.5 Calentamiento global

El calentamiento global es el aumento de la temperatura media de la atmósfera terrestre y de los océanos, causado principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la actividad humana. Este fenómeno tiene graves consecuencias para la vida en el planeta, como el deshielo de los polos, el aumento del nivel del mar, la alteración de los ecosistemas, la pérdida de biodiversidad, la desertificación, la escasez de agua, el incremento de los fenómenos meteorológicos extremos y el impacto en la salud humana (Cordero, 2012; Pachecho y Hernández, 2019).

Se ha determinado mediante la variación anormal de los registros climáticos históricos en las temperaturas terrestres y marinas que habían permanecido por décadas o siglos en el planeta Tierra, puede presentarse por orígenes naturales o antropogénicos, aunque en la literatura se menciona que estos últimos lo aceleran de forma drástica. La preocupación ante esta problemática surge por los riesgos a la salud alimentaria y energética, desastres naturales y escasez de agua.

Se confirmó con mayor claridad la influencia humana sobre el sistema climático en el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (2014). En este se afirma que debido a la concentración actual y a las continuas emisiones de gases de efecto invernadero, es probable que el final de este siglo la temperatura media mundial continúe creciendo por encima del nivel preindustrial y que la mayoría de los efectos del cambio climático persistirán durante muchos siglos, incluso si se detienen las emisiones.

De acuerdo con el *World Wildlife Fund* (n.d) el cambio de temperatura tiene una temporalidad corta, la cual tiene su origen vinculante en la concentración de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), vapor de agua (H₂O), ozono (O₃) y óxido nitroso (N₂O). También el WWF menciona que el 68% de las emisiones globales vienen de sólo diez países entre ellos México, que contribuye con el 1.68%. Destaca las principales fuentes de emisiones de los GEI en México son debido al transporte, la generación de electricidad y la industria.

Callery (2021) explica este fenómeno de manera antropogénica, “si el calentamiento fuera causado por una mayor actividad del Sol, entonces los científicos esperarían ver temperaturas

más calientes en todas las capas de la atmósfera. Sin embargo, han observado un enfriamiento en la parte superior de la atmósfera y un calentamiento en la superficie y en partes más bajas de esta capa. Esto se debe a que los gases de efecto invernadero están atrapando calor en la parte más baja de la atmósfera”. En este sentido, la magnetósfera aún nos mantiene protegidos pero los contaminantes que se derivan de las actividades humanas tienen efectos inmediatos en la capa más baja de la atmósfera.

El cambio climático es un tema que ha generado mucha atención mediática y científica en las últimas décadas, así como también ha inspirado diversas obras literarias que reflejan las preocupaciones y los escenarios posibles ante esta realidad (BBVA, 2021). Sin embargo, también existe una gran controversia y desinformación sobre este tema, lo que dificulta la toma de conciencia y la acción colectiva para mitigar y adaptarse al cambio climático (Cordero, 2012; Navarro, Moreno y Rivero, 2020).

Por ello, es necesario educar a la población sobre las causas, las evidencias, los efectos y las soluciones del calentamiento global, basándose en fuentes confiables y actualizadas. Asimismo, es imprescindible impulsar políticas globales y locales que promuevan el desarrollo sostenible, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, el uso eficiente de los recursos naturales, la conservación de la biodiversidad y la adaptación a los cambios climáticos (Cordero, 2012; Pachecho y Hernández, 2019).

1.5.1 Islas de calor urbanas y su impacto sobre el bienestar humano

Gartland (2008) define la isla de calor urbana como un fenómeno de mayor presencia de aire caliente que se produce en las áreas a nivel urbano y suburbano como consecuencia de utilizar materiales que en mayor medida tienen una alta capacidad de absorción y retención del calor solar (conocido como albedo), más alta que las de materiales de origen natural o de áreas rurales con menor desarrollo. Esto también va correlacionado a la concentración de gases de efecto invernadero por los procesos químicos urbanos.

De acuerdo con Martin, Baudouin y Gachon (2015), el concepto de isla de calor urbana excluye la comparación rural y estudia las islas de calor con base en el promedio espacial de la temperatura dentro de los límites administrativos de la ciudad, debido a esto, se contempló la delimitación de la ZMCT en el espacio construido.

Corrales & Brenes (2019) atribuyen la formación de las islas de calor a 3 factores principalmente; a) los efectos de la transformación de la energía en las ciudades; b) el decrecimiento de la evapotranspiración; c) la producción de energía antropogénica. También los factores que influyen en el tamaño y la intensidad de la isla de calor mencionados por Gálvez (2013) son: el espacio edificado, la densidad de población, las superficies ajardinadas y la intensidad vehicular.

El espacio edificado lo explica por la aparición de nuevos materiales no naturales (hormigón, acero, asfalto, etc.) los cuales producen una mayor capacidad de retención calorífica que aumenta la temperatura urbana. Por lo tanto, existe una correlación que entre a mayor área edificada con este tipo de materiales, mayor superficie e intensidad tendrá la isla de calor.

La densidad de población la asocia tanto al uso residencial como de las actividades económicas, relación expresada mediante una distribución espacial a lo largo del día (cambios de densidades en la ciudad). Las superficies ajardinadas han demostrado capacidad mitigadora por su mecanismo natural de refrigeración (evapotranspiración), aunque también, en menor medida, la existencia de suelo natural en vez de pavimentos de materiales oscuros como alquitrán o similares. La intensidad vehicular se asocia directamente sobre la localización, tamaño e intensidad de la isla de calor.

Efectos en el bienestar humano

De acuerdo con la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (2017), una de las consecuencias más seguras y directas del Cambio Climático es un aumento en la morbilidad y la mortalidad humanas en períodos de clima extremo como son las olas de calor.

La letalidad de una ola de calor aumenta si ocurre al principio del verano (cuando la población todavía no ha podido aclimatarse), si es de larga duración y si hay temperaturas nocturnas elevadas. Estos efectos son peores en las ciudades debido al efecto de isla de calor urbano que involucra la liberación nocturna del calor almacenado durante el día en el cemento y los materiales metálicos urbanos.

Las personas mayores con problemas cardiacos o respiratorios son particularmente vulnerables porque el calor extremo puede exacerbar estas condiciones preexistentes. La falta de acceso a sistemas de aire acondicionado aumenta también el riesgo de muerte por calor, lo que introduce un factor de tipo socioeconómico. La contaminación del aire por los gases de efecto invernadero provoca también una serie de consecuencias serias para la salud y un aumento en la temperatura puede incrementar la formación de contaminantes secundarios como el ozono en la troposfera. El calor prolongado también puede provocar un aumento en la dispersión de alérgenos, como esporas de hongos y polen, incrementando las reacciones alérgicas y asma.

Es importante destacar que las altas temperaturas disminuyen la productividad económica, reducen los ingresos medios y amplían la desigualdad (Burke et al., 2015). Las zonas urbanas representan la mayor parte de la productividad económica y ya experimentan temperaturas más altas a causa de la ICU, por lo que, a medida que continúe el cambio climático, las economías urbanas se verán especialmente afectadas. Al calcular los costos económicos del cambio climático para las ciudades globales, los investigadores encontraron que contabilizar el efecto de la ICU local aumenta las pérdidas económicas en un 260 % (Estrada et al., 2017). Esto demuestra que las ciudades se enfrentarán a importantes pérdidas económicas como resultado de sus elevadas temperaturas.

1.6 Experiencias metodológicas en el estudio de islas de calor y áreas verdes urbanas

Es importante caracterizar las variantes de una isla de calor urbana, ya que existen diferentes formas de cuantificar e identificar espacialmente este fenómeno por encontrarse a diferentes escalas como: microescala, escala local y meso escala. La meso escala puede estar combinada por diferentes escalas locales; la escala local es una subcapa de rugosidad (capa atmosférica más baja inmediatamente adyacente a una superficie cubierta con elementos) donde se combinan un número de casas dentro de un distrito y; la microescala también es otra capa de rugosidad para representar casas y árboles individuales.

Tipos de islas de calor urbanas de acuerdo con el proceso, categorizadas por Martin, Baudouin y Gachon (2015).

Procesos verticales

Isla de calor urbana con capa de dosel (CLUHI): se encuentra a escala local y microescala sobre la capa dosel urbana (UCL). Esta fue la primera distinción original entre islas de calor atmosférico Oke (citado en Martin, Baudouin y Gachon, 2015) la definió como el área desde la superficie hasta aproximadamente la altura media de un edificio.

Isla de calor urbana de capa límite (BLUHI): se encuentra a mesoescala y escala local sobre la capa límite urbana (UBL). Esta capa está por encima de la capa dosel urbana y está influenciada por la superficie subyacente urbana.

Procesos horizontales

Isla de calor urbana superficial y subterránea (SUHI y SSUHI): se encuentra a mesoescala, escala local y microescala. Para poder identificarlas, se observan a través de los patrones espaciales de radiación térmica ascendente recibido por un sensor remoto.

Isla de calor intraurbana de superficie (SIUHI): se encuentra a mesoescala, escala local y microescala. Se excluye cualquier comparación rural. La referencia térmica de estas islas de calor intraurbanas de superficie (SIUHI) recientemente definidas se basa en varios umbrales de temperatura por encima del promedio espacial de las LST dentro de los límites administrativos de una ciudad.

Antecedentes en el estudio de islas de calor urbanas

El primer estudio sobre isla de calor en la zona de Toluca (Jáuregui, 1979) fue apoyado por un psicrómetro y anemómetro, mediante toma de datos temperatura y viento en febrero en un momento del día y de noche a una altura de 1.20m sobre el pavimento, también analizó los datos de las estaciones meteorológicas durante el año de 1976. Encontró que la intensidad de la isla de calor fue de 5.0°C.

Méndez et al., (2007) estudiaron el fenómeno de la isla de calor en la ciudad de Toluca mediante la identificación de espacios con anomalías en su temperatura mediante toma de datos de dos días en verano e invierno durante el día y la noche con base en los datos de las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA). Los valores más altos fueron diferencias de 3.0°C durante el día y 1.5°C por la noche en el invierno, para el verano la oscilación fue de 2.0°C.

Otro estudio de islas de calor en verano e invierno en la ciudad de Toluca por Romero et al., (2011) consideraron condiciones atmosféricas para la toma de datos de estaciones meteorológicas. Identificaron una isla de calor en verano y en invierno, donde se dispone la mayor temperatura hacia el centro de la ciudad, las oscilaciones encontradas tanto en el día como la noche fueron de 4.0°C y 5.0°C

Antes de continuar es importante tener en cuenta el concepto de percepción remota, ya que diversos estudios sobre islas de calor se apoyan en esta ciencia. De acuerdo con *Canada Centre for Remote Sensing (CCRS, 2016)*, la percepción remota es la ciencia de adquirir información sobre la superficie de la Tierra sin estar en contacto con ella. Esto se hace detectando y registrando la energía reflejada o emitida y procesando, analizando y aplicando esa información. En gran parte de la percepción remota, el proceso implica una interacción entre la radiación incidente y los objetivos de interés. También se debe tener en cuenta, sin embargo, que la teledetección también implica la detección de la energía emitida y el uso de sensores sin imágenes, como es el caso del radar. (Universidad de Murcia, n.d.)

Entre los últimos estudios de islas de calor relacionados a la zona de estudio, fue el publicado en 2017 por Rivera et al., donde se analizaron las variaciones de temperatura en el año 2014 respecto a su estacionalidad, además de una comparación entre la isla de calor urbana

atmosférica con datos de estaciones meteorológicas y otra urbana superficial (la cual se obtiene mediante el tratamiento de imágenes satelitales que tienen bandas térmicas). Como resultado, las islas de calor urbanas atmosféricas nocturnas mostraron presencia durante todo el año de la atmósfera nocturna y su punto máximo fue en otoño (hasta 6 °C). Durante el día se produjeron en verano y otoño con una intensidad máxima de 4°C. Por su parte, las islas de calor urbanas superficiales se encontraron en primavera, verano y otoño alcanzaron máximas de 19° C de intensidad.

Martínez (2022) tuvo como hipótesis encontrar islas de calor en los municipios de Toluca, Metepec, San Mateo Atenco, Lerma, Santiago Tianguistenco y Ocoyoacac, pero donde se encontraron temperaturas superficiales más altas fue en Almoloya de Juárez.

Vlassova et al., (2016) en su investigación de cálculo del LST (temperatura de la superficie terrestre) consideró las fechas y condiciones de iluminación en el momento de adquisición de las imágenes utilizadas, además de utilizar las bandas ópticas de las regiones espectrales de rojo (0.63 a 0.69 μm) e infrarrojo cercano (0,76-0,90 μm), con una resolución espacial de 30 m y la banda térmica (10,4-12,5 μm), con una resolución de 120 m. Para el análisis temporal de vegetación utilizó el índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI, el cual utiliza las bandas de regiones espectrales rojo e infrarrojo cercano. Este índice también sirve para calcular la emisividad dentro del LST.

Aragón et al. (2020) analizaron las islas de calor por medio de imágenes satelitales Landsat y sistemas de información geográficos, en estas imágenes aplicaron un criterio de nubosidad inferior al 26%. Para el tratamiento de las imágenes sólo utilizaron un sistema de información geográfico mediante la herramienta de Calculadora Ráster que interactúa con las bandas de la imagen satelital, calcularon el índice NDVI. En la segunda etapa del trabajo obtuvieron datos de temperatura del aire con información de estaciones meteorológicas. Posteriormente, elaboraron Figuras de distribución de temperatura por medio de coKriging ordinario con un modelo de semivariograma esférico. Los comparativos entre las imágenes y las estaciones permiten identificar las zonas mayormente urbanizadas respecto a las de mayor vegetación.

Soto (2020) estimó la isla de calor urbana en Medellín, Colombia por medio de imágenes de satélite Landsat (1986 a 2016), aplicó corrección de las imágenes y procesó las imágenes utilizando las bandas térmicas para Landsat 5 (6), Landsat 7(6) y Landsat 8(10). El análisis

de temperatura superficial y densidad de vegetación lo basó en la identificación de tendencia de cambio a lo largo del periodo de estudio por medio de una división de barrios.

Casadei et al. (2021) analizaron de forma regional en Argentina los efectos de las islas de calor y la influencia de la vegetación urbana en estas mediante satélite MODIS. De 100 ciudades estudiaron 55 ubicadas en un amplio gradiente de precipitación anual (150 a 1900 mm/año) y temperatura media (13 a 25°C) en un promedio de 15 años y 10 ecorregiones. Utilizaron el sistema de información geográfica QGIS para calcular la temperatura y extensión de superficie urbana.

También se han elaborado estimaciones de la temperatura superficial terrestre del Amazonas por aumento de la deforestación (Velandia, 2019), el área de estudio corresponde a un subconjunto de la Amazonía colombiana que involucra los municipios de La Macarena y Puerto Santander.

En relación con análisis multitemporales, Martínez (2020) Estimó la temperatura superficial en imágenes históricas Landsat 5 mediante corrección atmosférica monocanal en el térmico para la cuenca del río Tempisque-Bebadero (Costa Rica). También probó la eficacia del uso de recursos libres y software de código abierto, tal es el caso del software libre muy famoso llamado GvSIG mediante la calculadora de Figuras.

Chaudhuri & Kumar (2021) Evaluaron la dinámica espaciotemporal de la contribución de los servicios ecosistémicos urbanos (UES) en la regulación del confort térmico en la ciudad de Bhubaneswar, India. Elaboraron una correlación entre LST y UES, donde tuvieron como resultado correlaciones significativas.

Dentro de los estudios para la mitigación, Marando et al. (2019) analizaron la regulación de los servicios de los ecosistemas y la infraestructura verde para la evaluación de la mitigación del efecto de la isla de calor urbano en el municipio de Roma, Italia. Los resultados muestran que la infraestructura verde mitiga significativamente el clima urbano cálido durante el verano.

1.6.1 Intensidad islas de calor urbanas superficiales (IICU)

IICU se define como la diferencia de temperatura de la superficie terrestre (LST) entre las áreas urbanas y rurales. Shastri y Ghosh (2019) utilizan dos formas de definir la IICU: una basada en el percentil 95 de LST urbana y otra basada en la media de LST urbana. Ambas definiciones requieren identificar las variaciones entre áreas urbanas y rurales mediante un umbral de densidad de población. Los autores explican que diferentes definiciones de IICU no afectan al patrón espacial y temporal del ICUS, sino solo al valor exacto de IICU, especialmente en los años con condiciones meteorológicas extremas.

En otro estudio (Zheng, Chen, y Hu, 2022) se analizó el efecto de la morfología urbana en la intensidad de la isla de calor urbana superficial (IICU) para la megalópolis de Chang-zhu-tan. El efecto IICU se define como la diferencia de temperatura entre las zonas urbanas y las zonas rurales circundantes. Se utilizaron datos de temperatura obtenidos por satélites y datos de morfología urbana obtenidos por modelos tridimensionales para calcular la IICU y sus componentes radiativos y aerodinámicos. Además, exploraron las relaciones entre la IICU y los indicadores de morfología urbana, como la altura de los edificios, la densidad de construcción, el ancho de las calles y el índice de área foliar.

Los principales resultados comprendieron una variación significativa de la IICU, desde -0.6 °C hasta 3.5 °C, con un promedio de 1.4 °C. También que la IICU está influenciada por el clima regional, siendo más alta en las regiones áridas y semiáridas y más baja en las regiones húmedas y frías. Los indicadores de morfología urbana que más se correlacionan con la IICU son el ancho de las calles y el índice de área foliar, que tienen una relación negativa con la IICU, y la altura de los edificios y la densidad de construcción, que tienen una relación positiva con la IICU.

Siddiqui et al. (2021) analizaron los cambios y tendencias estacionales y anuales de la temperatura superficial de la tierra y la intensidad de la isla de calor urbana superficial (SUHII en inglés) para tres ciudades indias (Lucknow, Kolkata y Pune) durante el período 2001-2018, utilizando datos de temperatura obtenidos por satélites.

Consideran que el efecto de isla de calor urbana puede medirse a diferentes niveles, como la temperatura superficial de la tierra (LST), la temperatura del aire cerca de la superficie (T_{air}) y la temperatura del aire a 2 m de altura (T_{2m}). El estudio se enfocó en la LST y la IICU,

que se define como la diferencia entre la LST urbana y la LST rural. El método utilizado para calcular la LST y la IICU consistió en utilizar datos de temperatura obtenidos por los sensores MODIS y VIIRS a bordo de los satélites Terra, Aqua y Suomi-NPP. El artículo utiliza un algoritmo basado en el índice de vegetación mejorado (EVI) para clasificar los píxeles en urbanos y rurales, y aplica una corrección atmosférica para eliminar los efectos de los aerosoles y el vapor de agua. También utilizaron datos meteorológicos para analizar los factores climáticos que pueden influir en la LST y la IICU.

Los resultados del análisis de LST e IICU para las tres ciudades indias, tanto a nivel diurno como nocturno, y tanto a nivel estacional como anual determinaron que el valor LST nocturno es un mejor indicador para estudiar el efecto del calentamiento urbano debido a su sensibilidad a la urbanización. Se observaron tendencias positivas en la LST diurna (0.003 a 0.059 °C/año) y nocturna (0.030 a 0.078 °C/año) en todas las ciudades, excepto en Pune donde se produce un enfriamiento urbano durante el día. La SUHII nocturna es positiva para todas las ciudades con una IICU media anual que varía entre 1.34 y 2.07 °C. El análisis estacional indica altas tasas de calentamiento durante las estaciones del monzón y el verano, especialmente durante la noche (0.062 a 0.1 °C/año). LST y la SUHII están influenciadas por factores climáticos como la precipitación, la humedad relativa, el viento y la nubosidad.

Geng et al. (2023) investigaron cómo las zonas climáticas afectan a las variaciones, tendencias y posibles factores que influyen en la intensidad de la isla de calor urbana superficial (IICU) basándose en 253 ciudades chinas en cinco zonas climáticas: zona templada media (MTZ), zona templada sur (STZ), zona subtropical norte (NSZ), zona subtropical media (MSZ) y zona subtropical sur (SSZ) durante el período 2001-2020. Utilizaron datos de satélite para calcular la IICU y aplicaron un modelo de bosque aleatorio para identificar los principales factores que influyen en la IICU, como el área de la ciudad, la profundidad óptica de los aerosoles, la precipitación, la humedad, el viento y la nubosidad. Encontraron que el área de la ciudad es el factor más importante que influye en la IICU en todos los períodos y zonas climáticas, seguido de otros factores que tienen efectos más significativos en ciertos períodos y zonas climáticas, como la profundidad óptica de los aerosoles en el invierno nocturno en MTZ y STZ.

Es así como diversos estudios en torno al cálculo de la IICU han demostrado ser confiables en comprender cómo se comportan las islas de calor urbana en diferentes ciudades, estableciendo relaciones con las diferentes zonas climáticas, localización geográfica y morfología urbana.

Índice de Varianza del Campo Térmico Urbano (UTFVI)

El UTFVI (por sus siglas en inglés) es el índice de varianza de área térmica urbana. Es un indicador que mide la intensidad y la extensión del efecto de isla de calor urbano (ICU). Recordemos que el ICU es el fenómeno por el cual las áreas urbanas tienen temperaturas más altas que las áreas rurales circundantes debido a la modificación del uso del suelo, la emisión de calor antropogénico y la reducción de la vegetación. El UTFVI se calcula a partir de la temperatura de superficie terrestre (LST) obtenida por imágenes satelitales para poder evaluar el impacto del cambio climático y la urbanización en el ambiente térmico urbano (Degerli y Cetin, 2023).

El estudio de Degerli y Cetin (2023) se centró en la ciudad de Samsun, usaron datos de temperatura de la superficie terrestre (LST) de imágenes Landsat ETM+ y OLI/TIRS para analizar el efecto de la isla de calor urbana (ICU). El índice UTFVI se utilizó para describir cuantitativamente el efecto ICU. Los resultados muestran que el efecto ICU aumentó en la zona costera de Samsun en 20 años.

En Lahore, Pakistán, Nasar-U-Minallah et al. (2023) analizaron las condiciones ecológicas y térmicas entre los años 2000 y 2020. Utilizaron imágenes satelitales de Landsat para calcular el índice de islas de calor urbanas y el índice de varianza del campo térmico urbano (UTFVI), basados en los datos de temperatura superficial de la tierra (LST). Estos índices permitieron evaluar el efecto de las islas de calor urbanas y la calidad de vida humana. En relación con el UTFVI, los resultados mostraron que el valor UTFVI más bajo se observó en las zonas con una densa cobertura vegetal, mientras que los puntos calientes de mayor UTFVI se observaron principalmente en las zonas de transición y expansión urbana. Estas zonas con puntos calientes más altos son más vulnerables al efecto de las islas de calor urbanas.

Un estudio de Hangzhou, China (Zhang et al., 2023) tuvo como objetivo evaluar y predecir cambios en el ambiente térmico urbano mediante el monitoreo de la variación del índice de varianza del campo térmico urbano (UTFVI) afectado por cambios de cobertura vegetal

fraccionada (FVC). Los resultados indicaron que el área de FVC de alto nivel probablemente disminuirá en un 52,91%, mientras que el área de FVC de nivel inferior probablemente aumentará en un 33,83% de 1990 a 2030. Además, el área de UTFVI de nivel más fuerte muestra una tendencia significativa de expansión aumentando en 467.299 km² de 1990 a 2030, mientras que el área de otros niveles UTFVI mostraron diferentes grados de disminución.

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

En la ciudad de Bhopal, India, Singh et al. (2023) evaluaron el impacto de los cambios de uso del suelo para entender la relación entre el uso del suelo y la urbanización sobre la tendencia creciente de la temperatura superficial del suelo. Para ello, cuantificaron los cambios espaciales en el uso y cobertura del suelo (LULC) y la isla de calor urbana (ICU) de la ciudad de Bhopal durante 12 años (2008 a 2020) utilizando datos satelitales y de campo multitemporales.

Utilizaron los sensores Landsat-5 TM y Landsat-8 OLI/TIRS para estimar los cambios físicos como el uso del suelo, el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI), el índice de construcción diferencial normalizado (NDBI), la temperatura superficial del suelo (LST) y correlacionar su interrelación. Identificaron que el área construida aumentó un 12,57% de 2008 a 2020, y la vegetación aumentó un 15,95% de 2008 a 2020. También encontraron que la región rocosa desnuda se convirtió en vegetación en un 22.95%.

Para el distrito de Patna, (Yadav, Kumar y Swarup, 2023) en un estudio se utilizaron datos de sensores remotos y aplicaciones de SIG para examinar el efecto de la isla de calor urbano en relación con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en la Corporación Municipal de Patna (PMC) desde 1990 hasta 2021. Se analizó la variación temporal y espacial de la temperatura de la superficie terrestre (LST) y el NDVI en diferentes zonas climáticas locales (LCZ) y evaluaron la correlación entre ambos parámetros. Como resultados, se identificó que el UHI es más intenso en las zonas urbanas densas y compactas, donde el NDVI es bajo y el LST es alto, mientras que el efecto contrario se observa en las zonas rurales y periurbanas, donde el NDVI es alto y el LST es bajo.

En Bima, Indonesia, Karlinasari, Pertiwi, y Erizal (2023) analizaron el fenómeno de la isla de calor urbana mediante la cuantificación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST), el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Construcción Diferenciada Normalizada (NDBI). Los resultados indican que la Temperatura de la Superficie Terrestre alcanzó su punto máximo en 2016 a 32.54 °C, aumentó a 35.08 °C en 2019 y aumentó a 39.18 °C en 2022. Además, observaron que la Temperatura de la Superficie Terrestre exhibió una correlación positiva con el Índice de Construcción Diferenciada Normalizada (NDBI) y una correlación negativa con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

Servicios ecosistémicos

En un estudio de la ciudad de Tehrán, Irán (Ramyar et al. 2020), se evaluaron los servicios ecosistémicos (SE) proporcionados por los espacios verdes (análisis de oferta) y las necesidades socioecológicas en estos espacios (análisis de necesidades). Posteriormente, estas evaluaciones se utilizaron para encontrar las áreas urbanas con las mayores necesidades socioecológicas y con la menor oferta de espacios verdes con el fin de proporcionar una base confiable para la planificación multifuncional de espacios verdes. Estas evaluaciones también se utilizaron para analizar el estado de los servicios proporcionados en el medio ambiente y los servicios necesarios para responder a las necesidades culturales y ecológicas de las personas. Entre los resultados, las mayores necesidades de infraestructura verde se observaron en los distritos 2 y 15 de las zonas central y sudoriental de la ciudad de Teherán.

Sobre un estudio en la ciudad de Bilbao, España, se midieron tres servicios ecosistémicos (SE): retención de escorrentías, purificación del aire y enfriamiento, proporcionados por la vegetación y cuerpos de agua presentes en los espacios verdes y azules urbanos (UGBS) que conforman la infraestructura verde urbana (UGI). Un enfoque metodológico implicó un índice de desajustes entre la oferta y la demanda para los tres SE (MbSDES). Se realizó cartografía a nivel de barrio urbano, mostrando un claro desajuste entre la oferta y la demanda de SE en el área de estudio, ya que el 35% del vecindario mostró valores negativos para el MbSDES, lo que indicó que las UGBS reales no satisfacen la demanda de SE (de Manuel et al., 2021).

Karimi, Corstanje, y Harris (2021) presentaron un estudio sobre la modelización de servicios ecosistémicos en un área urbana que comprende las ciudades de Milton Keynes, Bedford y Luton en el Reino Unido. Realizaron una evaluación para analizar el cómo se agrupan los servicios ecosistémicos a una resolución espacial de 2 metros y la composición de estos grupos. Se modelaron seis servicios ecosistémicos utilizando el marco de trabajo InVEST a una resolución de 2 metros. Los resultados mostraron que los servicios reguladores tienden a presentar compensaciones y sinergias entre sí. Además, se identificaron cuatro tipos de agrupaciones de servicios ecosistémicos en áreas especializadas con erosión del suelo, retención de nutrientes, almacenamiento de carbono y abundancia de polinizadores.

Se elaboró un estudio para la ciudad de Valleta, Malta (Balzan et al.,2021) sobre la evaluación de servicios ecosistémicos urbanos para priorizar soluciones basadas en la naturaleza en un área urbana de alta densidad. Este se centra en las implicaciones derivadas de los patrones de distribución existentes de los servicios ecosistémicos. Utilizaron indicadores basados en proxis y conocimientos expertos para mapear y evaluar un conjunto de 14 servicios ecosistémicos. Realizaron análisis de proximidad y correlación para evaluar las desigualdades distribucionales resultantes de la disponibilidad diferenciada de tipos de ecosistemas con altas capacidades de servicios ecosistémicos para grupos con diferentes características socioeconómicas.

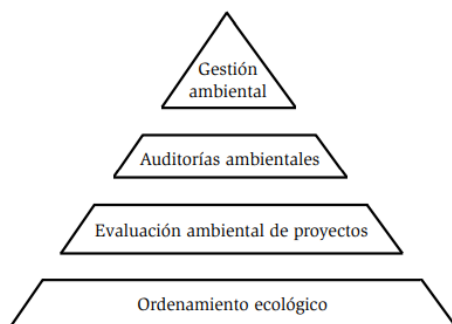
Los datos relacionados con la educación, el empleo, la enfermedad, la discapacidad y la vejez se combinaron para identificar áreas de ventaja y desventaja relativas. En relación con los resultados, las capacidades más altas de servicios ecosistémicos se encontraron en las áreas urbanas periféricas y las más bajas en los núcleos urbanos densos. Los jardines privados y los árboles urbanos tuvieron las capacidades más altas de servicios ecosistémicos reguladores por unidad de área. Por el contrario, los jardines públicos tuvieron una baja efectividad para los servicios ecosistémicos reguladores, pero las capacidades más altas para los servicios ecosistémicos culturales.

1.6.1 Análisis del Enfoque de Marco Lógico

De acuerdo con Camacho et. al. (2001) el proyecto es la “unidad básica de intervención en la cooperación para el desarrollo, pues tiene como finalidad satisfacer un conjunto de necesidades concretas a través de la aplicación de una serie de técnicas que ponen en juego un determinado número de recursos para obtener ciertos beneficios”. En este sentido, la generación de estrategias empleará las bases del método ecológico, partiendo de que los ambientes donde el ser humano se desenvuelve tienen influencia desde la infancia en las actividades que desarrolla de manera individual y colectiva.

Hace algunas décadas comenzó a gestarse el concepto de gestión estratégica o planeación ambiental donde Salinas, (1991) la concibió como una de las herramientas más apropiadas para planificar estrategias en materia ambiental (fig. 1). La Secretaría Distrital de Ambiente (2021) – que regula la sustentabilidad ambiental en Bogotá, Colombia- describe la planeación ambiental como aquella que fomenta la conservación del ambiente y el desarrollo sostenible, integra los temas de gestión y uso del suelo, contaminación del aire, contaminación visual y auditiva, contaminación hídrica, estructura ecológica principal, protección de ecosistemas, desarrollo socioeconómico, entre otros, de esta manera consideramos la problemática que se está viviendo en tiempo presente y qué estrategias y acciones favorables se llevarán a cabo visualizándolas en un tiempo futuro para generar un balance mediante el uso productivo de los recursos naturales y el mantenimiento de las funciones ecológicas.

Figura 1. La Planificación ambiental



Fuente: Salinas, 2005.

CAPITULO 2. METODOLOGÍA

2.1 Caracterizar la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca Mediante el Método Geográfico y Ambiental.

Se realizó la caracterización acorde con los principios epistemológicos de la Geografía, que conforman la localización, descripción, comparación, conexión y evolución; por medio de los Sistemas de Información Geográfica (cartografía temática).

En la primera fase se realizó una recopilación de información bibliográfica y cartográfica sobre las variables biofísicas y socioeconómicas que convergen en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca donde se delimita la zona conurbada de Toluca, Metepec, San Mateo Atenco, Zinacantepec y Lerma. La información cartográfica se obtuvo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, las imágenes satelitales del *U.S Geological Survey* (USGS), en formatos shapefile y GeoTIFF. Respecto al criterio de delimitación del área de estudio, así como de la división interna, se contempló la delimitación previa de Hernández (2020).

La información que se obtuvo se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Fuentes cartográficas y satelitales en formato digital

Insumo geoespacial	Fuente	Formato
Marco Geoestadístico	INEGI	shapefile
Censo de población y vivienda 2010 y 2020 de la ZMCT (nivel de detalle por AGEB)	INEGI	.xls
Climas	CONABIO	shapefile
Vientos dominantes	ProAire	shapefile
Precipitación anual	CONABIO	shapefile
Temperatura máxima anual	CONABIO	shapefile
Uso de Suelo y Vegetación S. VII	INEGI	shapefile

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se transformaron los insumos presentados en la Tabla 1, con *ArcMap* 10.6 para poder delimitar el área de estudio, (que será el punto de partida para procesar las imágenes de satélite). Por medio de la aplicación de métodos y herramientas de análisis geoespacial, se obtendrán los productos cartográficos para la representación de algunos de los componentes biofísicos y socioeconómicos que conforman la ZMCT (Tabla 2).

Tabla 2. Cartografía de la Zona Metropolitana de Toluca

Figuras de los componentes biofísicos	Figuras de los componentes socioeconómicos
Delimitación y ubicación geográfica	Asentamientos urbanos
Uso de suelo	Población por AGEB 2010 - 2020
Clima	Grado promedio de escolaridad 2010-2020
Vientos dominantes	Población económicamente activa 2010-2020
Precipitación anual	
Temperatura máxima anual	
Uso de suelo y vegetación	

Fuente: Elaboración propia.

Se analizaron los Figuras presentados en la Tabla 2 de acuerdo con los Principios Geográficos para describir los componentes biofísicos presentes en la zona de estudio. Posteriormente, se realizó un análisis descriptivo de las variables socioeconómicas, donde se puede observar la tendencia entre los asentamientos urbanos y la población para los años 2010 y 2020, ya que por la escala utilizada no es posible cuantificar la población en el año 2000 debido a que no están a nivel de Área Geoestadística Urbana (AGEB).

De esta forma se obtuvo una caracterización representativa y contextual de la ZMCT, que permitió interrelacionar los diferentes componentes identificados, los cuales se sustentan (en el sentido de su utilidad para el presente estudio) en la sección de resultados. De esta integración entre las variables mencionadas anteriormente, se logra el objetivo de la Ciencia Ambiental.

2.2 Ubicar y cuantificar las islas de calor, calcular el Índice de Varianza del Campo Térmico Urbano y calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para el año 2020 con imágenes de satélite en la ZMCT

2.2.1 Ubicar y cuantificar las islas de calor

En primer término, es importante definir el concepto de Temperatura de la Superficie de la Tierra o por sus siglas en inglés, Land Surface Temperature (LST) como una medida del calor de la superficie terrestre, que implica una absorción y reemisión de la radiación solar. Esta es la forma de diferenciarla de la temperatura del aire o tiempo atmosférico que tiene otros procedimientos de medición. Una cualidad de LST es que es una mezcla entre vegetación y temperaturas del suelo desnudo. Esto permite que LST sea un buen indicador para diferenciar la energía en el límite que hay entre la superficie terrestre y la atmósfera, pues su ventaja radica en ser sensible a las condiciones cambiantes de la superficie. (Nemani et al., 1996)

Por ello se entiende que el valor LST aporta un conocimiento del comportamiento térmico terrestre. Sin embargo, también hay que tomar en consideración que, debido a la heterogeneidad de la mayor parte de la superficie terrestre natural este parámetro puede llegar a ser complejo en su estimación y validación. Khan et al. (2021) mencionan los factores que pueden influir fundamentalmente en la estimación de LST tales como: las variaciones de temperatura con ángulos, disparidad de los subpíxeles en temperatura y cobertura, emisividad espectral superficial en las longitudes de onda, variaciones de temperatura y humedad atmosférica, nubes y grandes partículas de aerosol como el polvo.

En la siguiente tabla (3) se muestran las características de las bandas del satélite Landsat 8 que se utilizará para la obtención del valor de temperatura superficial y el índice de vegetación (para las áreas verdes urbanas) sólo para el año 2020.

Tabla 3. Bandas de Landsat 8 *Operational Land Imager (OLI)* and *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*

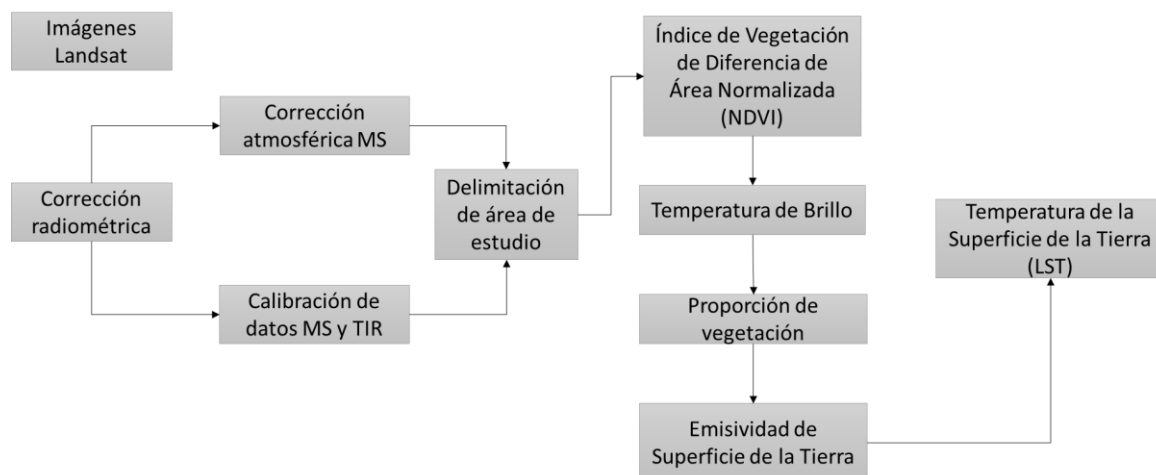
Bandas	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
Banda 1 – Aerosol Costero	0.43 – 0.45	30
Banda 2 – Azul	0.45 – 0.51	30
Banda 3 – Verde	0.53 – 0.59	30
Banda 4 – Rojo	0.64 – 0.67	30
Banda 5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 – 0.88	30
Banda 6 – Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	1.57 – 1.65	30
Banda 7 – Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	2.11 – 2.29	30
Banda 8 – Pancromática	0.50 – 0.68	15
Banda 9 – Cirro	1.36 – 1.38	30
Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
Banda 11 – Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En esta sección se presentan y describen los pasos necesarios para calcular LST a partir de imágenes Landsat Nivel 1 como se muestra en la figura 2 y la fórmula 1, esta metodología se ha utilizado en diversas publicaciones, entre ellas se encuentran los trabajos de Avdan & Jovanowska (2016); Ndossi & Avdan (2016); Soto (2019); Sekertekin & Bonafoni (2020).

Para Landsat 8 se deberá extraer la longitud de onda intermedia sólo de la banda TIR1.

Figura 2. Flujo de trabajo para procesamiento de imágenes Landsat.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Fórmula 1 para calcular LST:

$$LST = \frac{T}{\{1+(\lambda \frac{T}{\rho}) * \ln(\epsilon)\}} \quad (1)$$

Posteriormente al cálculo del parámetro LST en las diferentes imágenes, se calcula la ICU para cada una. Existen diferentes procedimientos para llegar a su cálculo. En algunos términos, se ha interpretado como isla de calor o intensidad de isla de calor, trabajos como Heinl et al. (2015); Yang et al. (2017); Yao et al. (2018); Soto et al. (2020) y Garau et al. (2021) determinaron la intensidad de la isla de calor por el cálculo de la diferencia entre la zona rural y la zona urbana.

Pero el procedimiento en sí mismo es complejo porque requiere, por poner dos ejemplos, técnicas de muestreo y transectos en diferentes zonas rurales de la imagen para poder calcular las diferencias considerando todos los píxeles y de no ser aplicado correctamente puede llegar a tener un margen de error amplio (no considerado) debido a los valores máximos y mínimos en los píxeles de temperatura. Debido a esto se definió con mayor viabilidad las propuestas de Xu et al. (2011), Abutaleb et al. (2015), Naim & Kafy (2021) y Moisa & Gemeda (2022).

Dichas propuestas para la obtención de las ICU se basan en el método *Mean-Standard Deviation*, que es un método ideal para la clasificación de grados de temperatura. La desviación estándar refleja el valor de desviación para la temperatura promedio. Este método internamente clasifica la temperatura en área de temperatura baja, área de temperatura baja secundaria, temperatura media, área de temperatura alta secundaria y área de temperatura alta. (Xu et al. 2011)

El método *Mean-Standard Deviation* se muestra en la fórmula 2.

$$ICU = \frac{LST - LST \text{ mean}}{STD} \quad (2)$$

Donde LST es la imagen con los valores mínimos y máximos, LST *mean* es el valor de la media y STD la desviación estándar. Posteriormente y como se indica en la tabla 4 se clasifican las intensidades de isla de calor, debido a la escala en la zona de estudio utilizada es necesario categorizar de uno en uno.

Tabla 4. Rangos de intensidad para la identificación de islas de calor

Rango de intensidad C°	Categoría
<0	Sin isla
0° – 1°	Muy débil
1° – 2°	Débil
2° – 3°	Moderadamente débil
3° – 4°	Moderada
4° – 5°	Moderadamente fuerte
5° – 6°	Fuerte
6° y más	Muy fuerte

Fuente: Adaptado de Fernández (1996) y Williams (2019).

2.2.1.1 Observación de campo

La investigación de campo tiene como base la observación, al mismo tiempo que se obtienen datos de la realidad sin alterarla y sin manipular las variables. En el caso del fenómeno de islas de calor que ha sido ampliamente estudiado, sirve como un ejercicio de comprobación de aquellos paradigmas científicos establecidos en torno a este fenómeno, además de identificar si las mismas características se presentan en relación con estudios previos de la zona de estudio.

Para el caso de los resultados que arroje la cartografía en las cuatro estaciones del 2020 de la intensidad de islas de calor urbanas superficiales (SUHII), se hizo un recorrido de campo con ayuda de la aplicación OSMTracker la cual permite crear una traza GPX como evidencia de la visita a los diferentes puntos de la ZMCT que presentaron mayores temperaturas a lo largo de las cuatro estaciones del 2020 para identificar las características que influyen en la formación o disminución de SUHII mediante recursos fotográficos y anotaciones en bitácora de lo observado.

Finalmente, se elaboró un Figura con la traza GPX del recorrido con los nueve puntos visitados y se realizó una descripción de las características encontradas en cada sitio, información que posteriormente sirvió de base para la elaboración de las estrategias de mitigación.

2.2.2 Ubicación y cuantificación del Índice de Varianza del Campo Térmico Urbano (UTFVI) en el año 2020.

Uno de los índices que permiten cuantificar la vulnerabilidad provocada por la isla de calor urbana y la calidad de vida de las ciudades, es el índice de varianza de campo térmico urbano (Naim & Kafy, 2021; Ullah, 2022; Moisa & Gameda, 2022) que se aplica usando la ecuación 3. Este se basa en el valor de la temperatura de la superficie terrestre de un área en particular y, en consecuencia, se analiza la intensidad de la isla de calor. Cuanto mayor sea el valor de la temperatura de la superficie terrestre, mayor será el efecto del calor (LIU et al. 2011).

$$UTFVI = \frac{T_s - T_m}{T_m} \quad (3)$$

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

El UTFVI se clasificó en cinco clases de acuerdo con Moisa & Gameda (2022) para hacer una descripción cuantitativa del efecto de la isla de calor para identificar el nivel de confort térmico y las zonas de incomodidad o con mayores riesgos para las actividades humanas. Donde resulten valores <0 son aquellas zonas de la ZMCT que presentaron mejor confort térmico. A continuación, se describen en la Tabla 5.

Tabla 5. Rangos y categorías de UTFVI

Rango UTFVI	Índice de varianza del campo térmico urbano (UTFVI)	Nivel de confort térmico urbano
Menor a 0	Ninguno	Excelente
0 a 0.005	Débil	Bueno
0.005 a 0.01	Medio	Normal
0.01 a 0.015	Fuerte	Malo
0.015 a 0.02	Muy fuerte	Muy malo
Mayor a 0.02	Fortísimo	Pésimo

Fuente: Moisa & Gameda, 2022.

2.2.3 Calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para el año 2020

Para identificar el comportamiento de la vegetación, se calcula el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. En principio, las plantas reflejan luz solar visible e infrarroja en diferentes longitudes de onda. La clorofila que es el pigmento de las hojas de las plantas absorbe fuertemente la luz visible (de 0.4 a 0.7 μm) para su proceso en la fotosíntesis, mientras que la estructura celular de las hojas refleja fuertemente la luz del infrarrojo cercano (de 0,7 a 1,1 μm). Cuantas más hojas tiene una planta, se ven afectadas estas longitudes de onda de luz, respectivamente. Se muestra en la fórmula 2 el procedimiento matemático de bandas para el cálculo del índice.

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (2)$$

Donde *NDVI* es el índice de vegetación de diferencia normalizada, *NIR* la banda del infrarrojo y *RED* corresponde a la banda en la región del rojo visible. El índice varía de -1.0 a 1.0; sin embargo, para poder identificar la vegetación sólo se encuentran como objetivos en la superficie de la Tierra variaciones entre 0.0 a 1.0. (Aquino et al., 2018)

Posteriormente se realiza la clasificación por clases que figura en la tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de valores NDVI

Criterio de clasificación	Clase
0.8 – 1	Alto
0.6 – 0.8	Moderadamente alto
0.4 – 0.6	Moderadamente bajo
0.2 – 0.4	Bajo
0 – 0.2	Muy bajo
<0	Suelo desnudo y/o agua

Fuente: Aquino et al. (2018)

2.3 Determinar la relación de las islas de calor con los Servicios Ecosistémicos de regulación climática: Captura de carbono, Reducción de ruido, Enfriamiento y Recreación, mediante indicadores de Servicios Ecosistémicos.

Para poder determinar la relación entre las islas de calor con los servicios ecosistémicos de regulación climática, en primer lugar, se debe partir de la obtención de la contribución de cada SE y su patrón en cada estación con ayuda de inventarios detallados de Espacios Verdes Urbanos, tanto en medidas (la superficie es importante porque se multiplica el área por el indicador) como en información vectorial (georreferenciados) para su posterior procesamiento en un Sistema de Información Geográfica.

Al no tener esta información disponible en la zona de estudio que comprende varios municipios conurbados, mediante técnicas de percepción remota se retomó la disponibilidad de las imágenes Landsat 8 previamente descargadas de cada estación del 2020.

Se realizó una composición de diferentes bandas que permitió identificar cuál composición era idónea para la posterior realización de una Clasificación Supervisada y se determinaron las bandas 4, 5, 6 por permitir diferenciar mejor los elementos de la ZMCT. En la tabla 7 se muestra la utilidad de las bandas 4, 5, 6 de Landsat 8 para la clasificación de vegetación, que han sido ampliamente utilizadas en estudios de cobertura de uso de suelo (Yu et al. 2019) y agricultura para conocer el estado y desarrollo de cultivos (Niu et al. 2019).

Tabla 7. Utilidad de bandas 4, 5, 6 de Landsat 8 para la clasificación de vegetación

Bandas	Longitud de onda (micrómetros)	Utilidad
Banda 4 – Rojo	0.64 – 0.67	Permite mapear cambios de vegetación basados en pendientes.
Banda 5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 – 0.88	Enfatiza el contenido de biomasa y las líneas costeras.
Banda 6 – Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	1.57 – 1.65	Discrimina el contenido de humedad del suelo y la vegetación, también penetra nubes delgadas.

Fuente: USGS, 2016.

2.3.1 Análisis cualitativo y cartográfico de la captura de carbono, reducción de ruido, enfriamiento y recreación.

Se establecieron cuatro tipos de servicios ecosistémicos urbanos considerados de esta forma por Derkzen et al. (2015) en un estudio de cuantificación de los servicios de los ecosistemas urbanos basados en datos de alta resolución de espacios verdes urbanos en Rotterdam una ciudad de Países Bajos, seleccionados por su relevancia para la salud humana y bienestar en las ciudades, en el cual se estableció una relación por medio de productos cartográficos que podrán representar el nivel de la contribución de la infraestructura verde del año 2020 a la isla de calor (tabla 8). Estos niveles se encuentran en una escala del mínimo al máximo valor por medio de patrones de vecindad.

De los EVU que se muestran en la tabla 8, sólo tres se lograron utilizar debido a la resolución de las imágenes Landsat 8 y la escala de la zona de estudio, al quedar de la siguiente manera: 1) árboles agrupados, que corresponde al EVU número dos; 2) árboles dispersos, que corresponde al EVU número uno; y 3) pasto, que corresponde al EVU número cinco.

Tabla 8. Descripción general de los indicadores de servicios ecosistémicos (SE) y las tasas de suministro, especificados por tipo de espacio verde urbano (EVU)

No.	Tipo EVU	Captura de carbono (kg m ⁻²)	Reducción de ruido (dB(A)100 m ⁻²) (distancia)	Enfriamiento (fracción UGS: peso)	Recreación (Valor de índice m ⁻²)
1	Árboles	10.64	-	1.0	2.15
2	Bosque urbano	15.62	1.125 (0.75-1.50)	1.0	2.90
3	Arbustos altos	7.79	2.000 (1.50-2.50)	1.0	2.55
4	Arbustos cortos	5.61	1.125 (0.75-1.50)	1.0	2.55
5	Hierba	0.17	0.375 (0.00-0.75)	0.5	2.55
6	Jardín	1.07	-	0.5	-
7	Cuerpos de agua	-	-	-	2.20
8	Otros	1.07	0.375 (0.00-0.75)	0.5	2.35

Fuente: Derkzen et al., 2015.

Los cuatro servicios ecosistémicos: captura de carbono, reducción de ruido, enfriamiento y recreación se estimaron mediante la multiplicación de las superficies de cada EVU por los indicadores de la tabla 9 extraídas con la Clasificación Supervisada, posteriormente se normalizaron y estandarizaron los datos de cada indicador de suministro del SE relacionado con la AGEB que le corresponde para el posterior análisis cartográfico y cuantitativo de cada SE en cada estación. A continuación, se enlista el procedimiento a seguir para calcular la contribución relativa de los SE en cada estación:

- 1.- Clasificación supervisada en las cuatro estaciones del 2020.
- 2.- Extracción de los tres EVU.
- 3.- Conversión ráster a vectorial.
- 4.- Superficie x indicador SE.
- 5.- Normalización de datos con la ecuación 3 (de Manuel et al., 2021).

$$\text{Transformación logarítmica} = (\log_{10}(x + 1)) \quad (3)$$

- 6.- Estandarización de datos con la ecuación 4 (de Manuel et al., 2021).

$$S = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (4)$$

- 7.- Representación cartográfica con escala cualitativa de cinco categorías: muy baja, baja, media, alta y muy alta.

Tabla 9. Indicadores para cuantificar la contribución relativa de los cuatro SE.

No.	Tipo EVU	Captura de carbono (kg m ⁻²)	Reducción de ruido (dB(A)100 m ⁻²) (distancia)	Enfriamiento (fracción UGS: peso)	Recreación (Valor de índice m ⁻²)
1	Árboles agrupados	15.62	1.125	1.0	2.90
2	Árboles dispersos	10.64	-	1.0	2.15
3	Pasto	0.17	0.375	0.5	2.55

Fuente: Elaboración propia con base en Derkzen et al., 2015.

2.3.2 Análisis cuantitativo y comparativo de la captura de carbono, reducción de ruido, enfriamiento y recreación.

Para la elaboración del análisis cuantitativo y comparativo de la contribución de los servicios ecosistémicos: captura de carbono, reducción de ruido, enfriamiento y recreación, se extrajo el área del ráster de cada servicio ecosistémico. La medida de superficie se determinó en hectáreas y posteriormente se calculó el porcentaje de contribución relativa de cada EVU respecto al servicio ecosistémico durante las cuatro estaciones del 2020. Con base en estos datos, para cada servicio ecosistémico se realizó un cuadro comparativo que resume el comportamiento de los cuatro servicios ecosistémicos por cada estación, este permite identificar cuál EVU presentó mayor contribución relativa en relación con una estación.

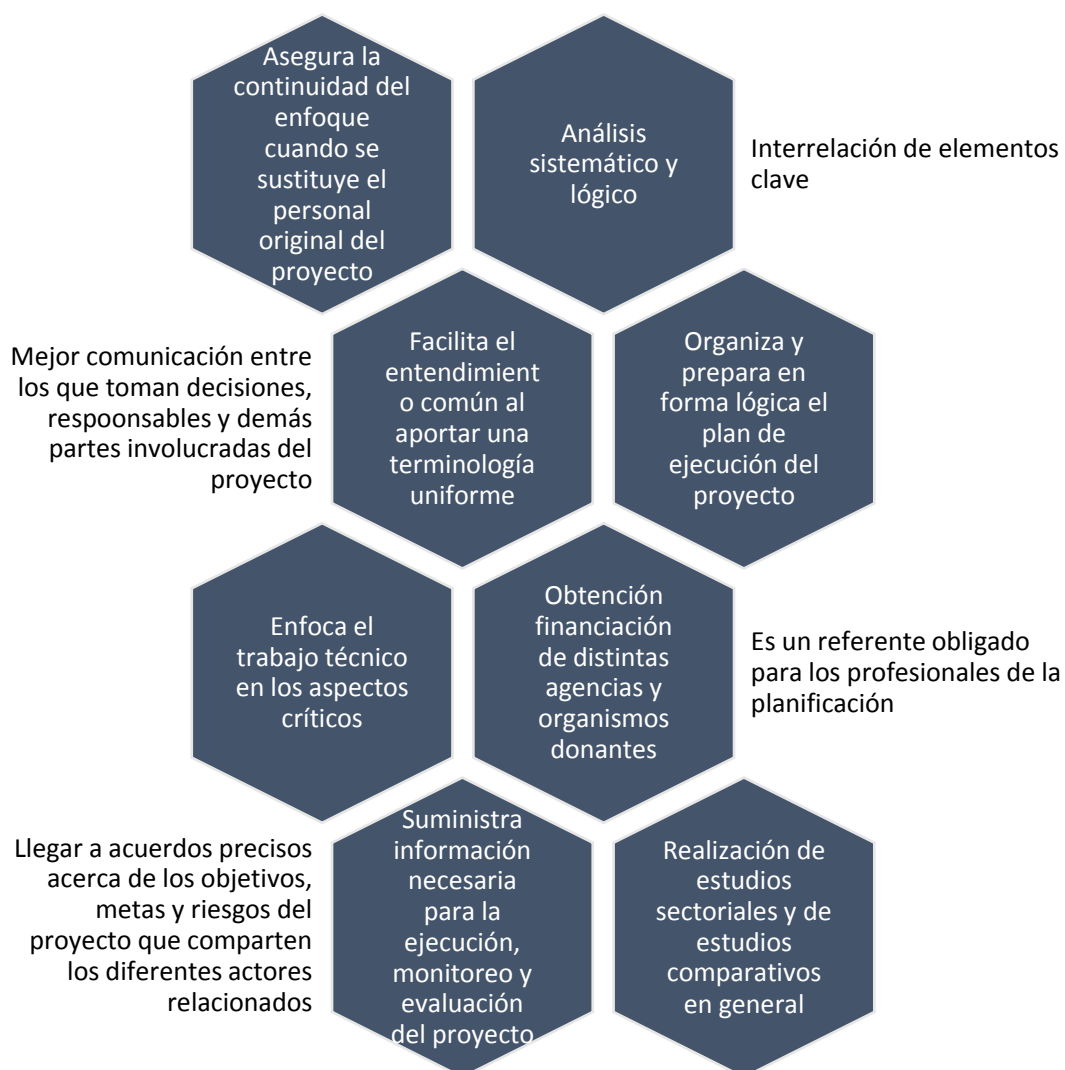
Como análisis comparativo final, se elaboraron cuatro cuadros comparativos separando cada servicio ecosistémico, así como la superficie que abarca en cada estación por medio de porcentajes, para poder identificar las variaciones estacionales de la contribución relativa, es decir, la estación o estaciones donde se encontraron mayores tendencias de un servicio ecosistémico de acuerdo con el EVU.

2.4 Planificación de estrategias para la mitigación de islas de calor en la ZMCT y mejoramiento del bienestar humano

2.4.1 Método de Análisis bajo el Enfoque del Marco Lógico (EML)

En la figura 3 se enlistan las ventajas de la aplicación del Enfoque de Marco Lógico (EML). El EML contempla cuatro fases centrales que incluye un conjunto de categorías internas o subetapas y algunas otras fases complementarias. Su importancia reside en la lógica circular y de flujos que subyace a la propuesta y no tanto en la denominación de cada etapa, que forma parte de convenciones y usos distintos, todos ellos en principio equivalentes y aceptables (Camacho et al. 2001).

Figura 3. Ventajas del Enfoque del Marco Lógico



Fuente: Elaboración propia con base en Hurtado y Medina, 2018

En la tabla 10 se describen las etapas del análisis bajo el enfoque del Marco Lógico, que servirán para identificar, diseñar, ejecutar y dar seguimiento, así como la posterior evaluación de un proyecto o propuesta.

Tabla 10. Fases del método del análisis bajo el enfoque del Marco Lógico

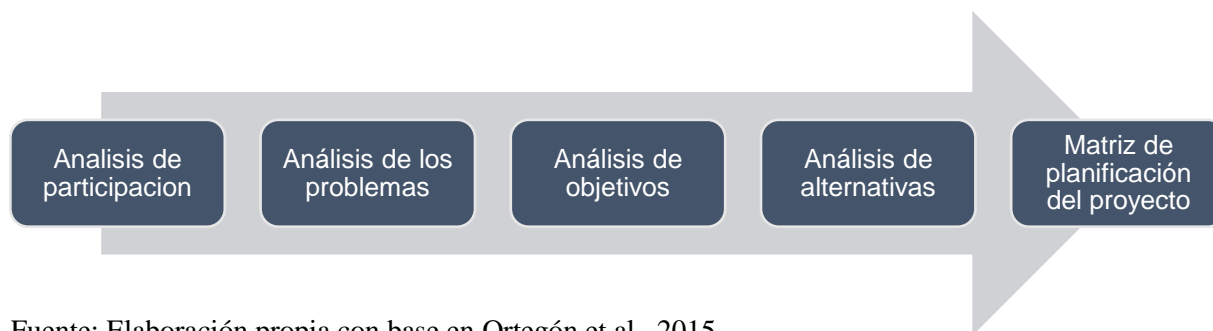
Etapas	Descripción
Identificación	Se trata, en esta fase de determinar cuáles son los problemas que han de resolverse o en su caso, las oportunidades que pueden aprovecharse. Implica aproximarse a un cierto análisis de la realidad.
Diseño	Consiste, por tanto, en formalizar y organizar los resultados obtenidos en el proceso de identificación, estableciendo estrategias, plazos, recursos, costos, entre otros.
Ejecución y seguimiento	Supone el momento de aplicación de los resultados del diseño a la acción práctica de cooperación con intención de transformar una determinada realidad.
Evaluación	La evaluación es la fase en la que se aprecia y valora para extraer conclusiones antes, durante y después de su ejecución.

Fuente: Adaptado de Ortegón et al., 2015

Pasos del método EML

Consta de cinco pasos de discusión que sistematizan las tareas imprescindibles durante las etapas de identificación y diseño de un proyecto de desarrollo. Los cuatro primeros pasos de la identificación contribuyen a sistematizar una de las fases más importantes de la vida de un proyecto que habitualmente tiende a quedar en una nebulosa de generalidades. Esos pasos se mencionan se muestran en la figura 4.:

Figura 4. Pasos del Método del Análisis bajo el Enfoque del Marco Lógico



Fuente: Elaboración propia con base en Ortegón et al., 2015

2.4.2 Generación de propuesta para la mitigación de las islas de calor en la ZMCT y mejoramiento del bienestar humano

Derivado de los resultados que se obtuvieron de la relación entre las islas de calor y los servicios ecosistémicos de regulación, se realizó la generación de propuestas de mitigación de las islas de calor en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca, pues este EML permitió identificar las acciones más relevantes para hacer frente a este problema.

Se pudo identificar y evaluar los factores políticos, sociales, culturales y ambientales que contribuyen a la resiliencia de la zona de estudio con los cuales se elaboró la Matriz de Estrategias FODA (Figura 5) y el Árbol de Objetivos bajo el EML. Hernández, (2020) planteó la ciudad como una unidad de análisis clave para entender la lógica de los llamados cinturones verdes, pues con ello se pone en marcha las políticas que unen planeación y ambiente, y en consecuencia la habilidad de incorporar a múltiples actores en la toma de decisiones; en este sentido, además de los cinturones verdes, también pueden considerarse aquellos servicios ecosistémicos que fungen como reguladores.

Esto supone una propuesta detallada de un modelo sustentable sobre el uso del suelo en la ZMCT y el análisis de la viabilidad de las áreas verdes, superficies reflejantes de la luz y cuerpos de agua, como algunos elementos para la mitigación de islas de calor.

Figura 5. Matriz de estrategias FODA

Estrategias FO Para maximizar Fortalezas y Oportunidades	Estrategias FA Para maximizar Fortalezas y minimizar Amenazas
Estrategias DO Para minimizar Debilidades y maximizar Oportunidades	Estrategias DA Para minimizar Debilidades y Amenazas

Fuente: Elaboración propia, 2021.

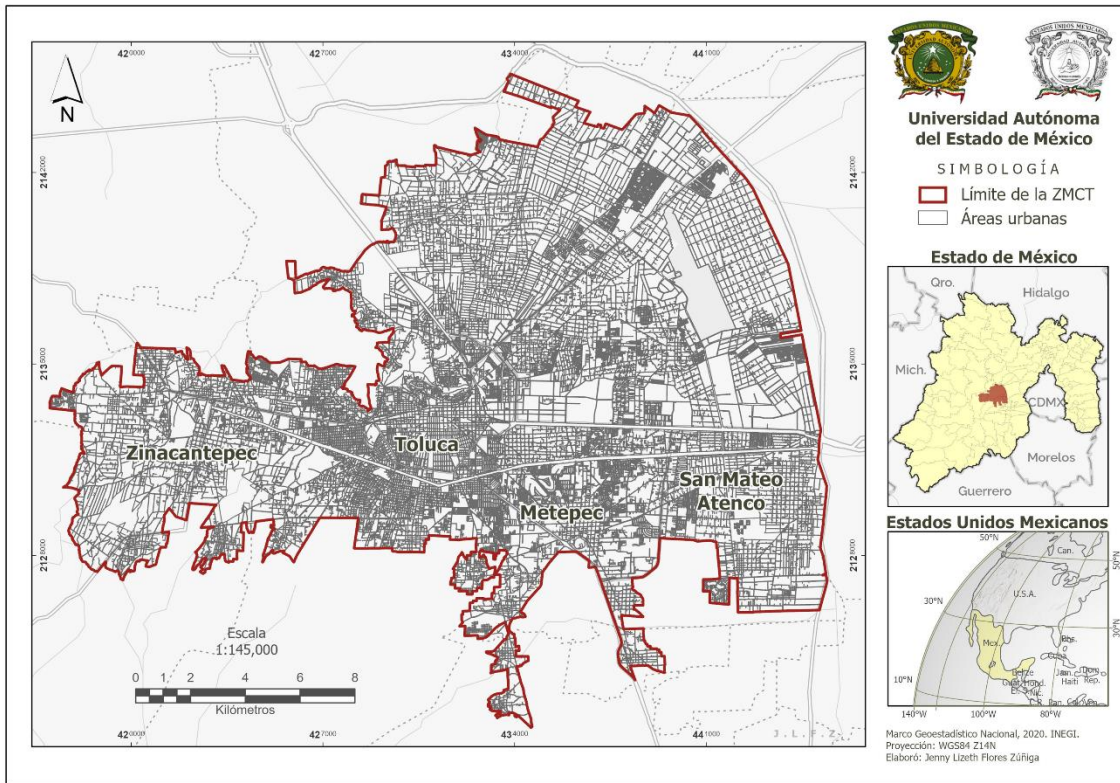
Posteriormente, se realizó el desarrollo y análisis del método árbol de objetivos, también llamado árbol de medios y fines o árbol de soluciones, este método es una herramienta que permite transformar el árbol de problemas causas (raíces) a medios y efectos (ramas) en fines, además de ser el punto de partida en el diseño de alternativas, llevando los medios hacia el diseño de estrategias.

CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización geográfica y ambiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca

El territorio de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca se ubica en la zona centro del Estado de México. Está conformada por nueve municipios que son: Almoloya de Juárez, Calimaya, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Otzolotepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec. Sus coordenadas extremas varían de los 19.1876498 a los 19.4035667 de latitud norte, de los 99.5217596 a los 99.7896601 de longitud oeste. La altura promedio es de 2,600 metros sobre el nivel del mar. (POER, 2011) (Figura 6).

Figura 6. Localización de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca en el contexto estatal y nacional



Fuente: Elaboración propia con base en Hernández, 2020

Los municipios colindantes son al norte Temoaya y Otzolotepec; al noroeste con Almoloya de Juárez; al sur con Calimaya; al sureste con Mexicaltzingo y Chapultepec; y al este con

Lerma. Como se muestra en la tabla 11, la superficie delimitada total es de 306.3 kilómetros cuadrados, que corresponde al 1.87 % del territorio estatal.

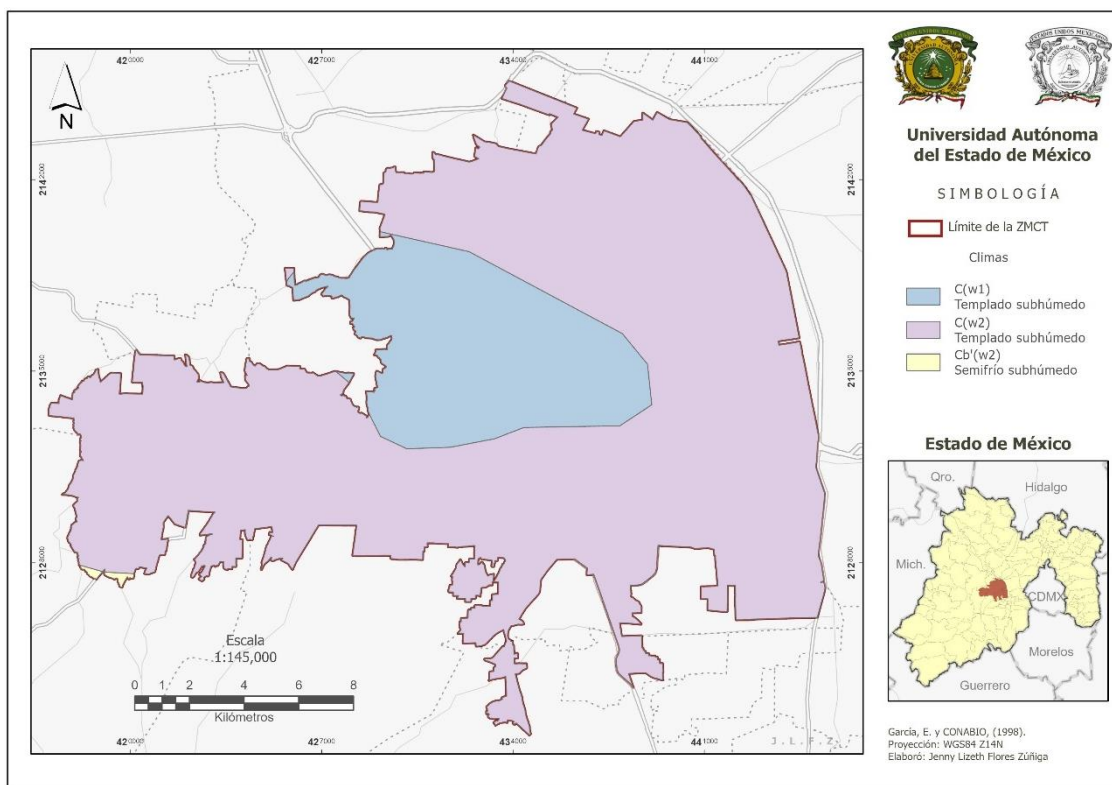
Tabla 11. Coordenadas y superficies de los municipios al interior de la ZMCT

Municipio	Latitud y Longitud	Superficie (km ²)	Superficie dentro de la ZMCT (km ²)
Toluca	19.29419, -99.666233	426.5	190.4
Metepec	19.2621831, -99.6164831	67.49	47.8
San Mateo Atenco	19.27733, -99.5789124	20.9	20.9
Zinacantepec	19.2836828, -99.7429439	310.1	47.2

Elaboración propia con base en Google Earth y Marco Geoestadístico Nacional, 2020.

3.1.1 Aspectos Físico-Bióticos

Figura 7. Climas identificados en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca



Fuente: Elaboración propia con base en García, E. y CONABIO, 1998.

De acuerdo con el Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca (2018) el clima más apto para el desarrollo urbano y el desarrollo de las actividades es el templado subhúmedo. En la ZMCT el clima predominante es templado subhúmedo C(w2), que presenta una temperatura

media anual entre 12°C y 18°C, la temperatura del mes más frío se encuentra entre los -3°C y 18°C y la temperatura del mes más caliente debajo de los 22°C.

La precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm; las lluvias de verano tienen un índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual. (véase Figura 7).

El clima C(w1) que también es templado subhúmedo tiene las mismas características del C(w2) con la única diferencia de que su coeficiente P/T (precipitación anual en mm sobre temperatura media anual en C°) se encuentra intermedio del C(w0) y C(w2) con valores que se encuentran entre 43.2 y 55.0 (González, 1965). Este coeficiente permite conocer la potencialidad de la disponibilidad del agua por su relación con la temperatura, la distribución de la vegetación, la distribución de algunas especies vegetales indicadoras y asimismo las zonas óptimas para establecer ciertos cultivos. (Orellana, 2020)

Otro clima identificado al suroeste de la ZMCT que comprende parte del municipio de Zinacantepec es el Cb'(w2) que entre sus características presenta; verano fresco y largo, su temperatura media anual ronda entre los 5°C y 12°C, la temperatura del mes más frío se encuentra entre los -3°C y 18°C, además la temperatura del mes más caliente está por debajo de los 22°C. Respecto a la precipitación, en el mes más seco el valor es menor de 40 mm; presenta lluvias de verano y el porcentaje de lluvia invernal varía del 5 al 10.2% del total anual.

Las tormentas más intensas (Tabla 12) ocurren entre los meses de junio, julio, agosto y septiembre con una precipitación que oscila entre 1,400 mm hasta 1,800 mm principalmente en las partes altas entre los 4,000-4,680 msnm. Las primeras heladas se registran generalmente después de la primera quincena de octubre y con mayor frecuencia en diciembre, enero y febrero. Las últimas heladas, en la mayor parte del territorio, se registran en febrero; sin embargo, en marzo todavía muestran gran influencia en altitudes superiores a los 2,700 msnm. (POER, 2009).

Tabla 12. Características de climas identificados en la ZMCT

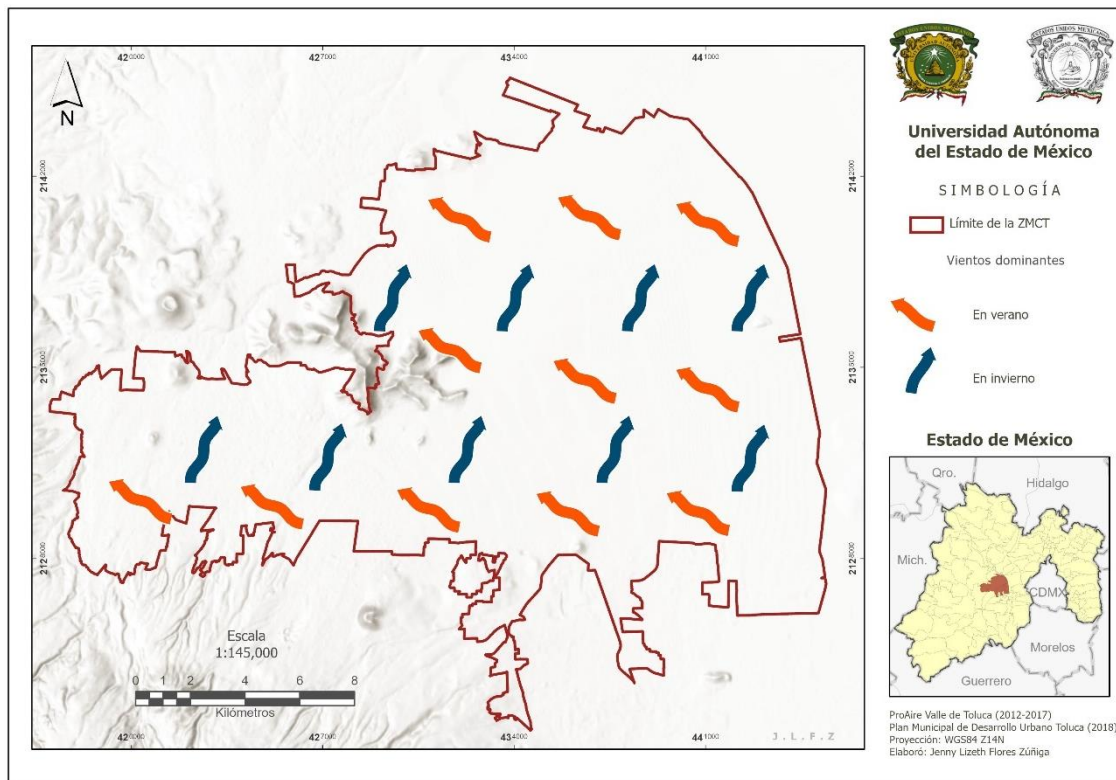
Clima	Temperatura media anual (°C)	Precipitación media anual (mm)	Altitud (msnm)
C (w1)	12 - 18	800 - 1200	2500 - 2900
C (w2)	12 - 18	805 - 1132	2600 - 2750
Cb'(w2)	5 - 12	1000 - 1500	2900 - 4000

Fuente: Elaboración propia con base en CONABIO y García, 1998; CONAGUA, 1990-2010

Vientos dominantes

La ZMCT se encuentra en la zona de influencia de los vientos alisios, cuya intensidad se expresa de manera débil e incluso estable en el período que comprende la época fría (noviembre a finales de febrero) predominando los vientos provenientes del sur y con dirección norte, con una ligera curvatura desviada a favor de las manecillas del reloj, todo esto en función del relieve, es el caso del volcán “Nevado de Toluca” que no permite que circulen libres los vientos que llegan por el sur provocando el cambio de su trayectoria y haciendo que se deslicen hacia el valle por su flanco sureste (Figura 8).

Figura 8. Vientos dominantes en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca



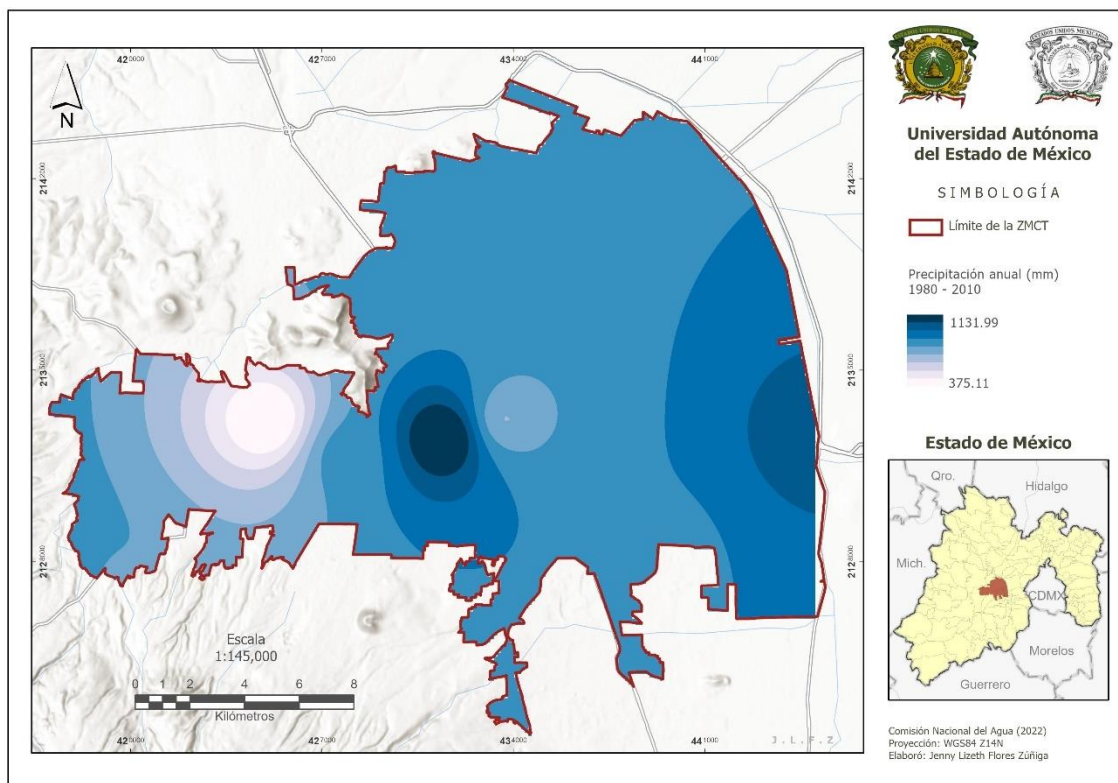
Fuente: Elaboración propia con base en el Plan Municipal de Desarrollo Urbano Toluca, 2018

La importancia de conocer el direccionamiento de los vientos radica en que estos influyen en la temperatura y precipitación de una región además de que permiten evaluar el sentido que tomarán los contaminantes emitidos por la actividad industrial y actividades productivas urbanas en general.

Precipitación

Se tomaron como referencia datos de 13 estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA,2022) y se interpolaron como puntos con el método de distancia inversa ponderada (IDW). Este valor de precipitación anual se tomó en cuenta por tener un soporte en la medición de 30 años que va desde 1980 hasta 2010. El dato más alto entre las estaciones fue de 1131.99 mm y el más bajo de 375.11mm (Figura 9). Se considera esta variable climática debido a que está fuertemente vinculada con la temperatura, pues un aumento de temperaturas en las superficies urbanas puede provocar una atmósfera inestable con vientos más intentos y por consecuencia precipitaciones más violentas. (Ronco, 2019)

Figura 9. Precipitación anual en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca



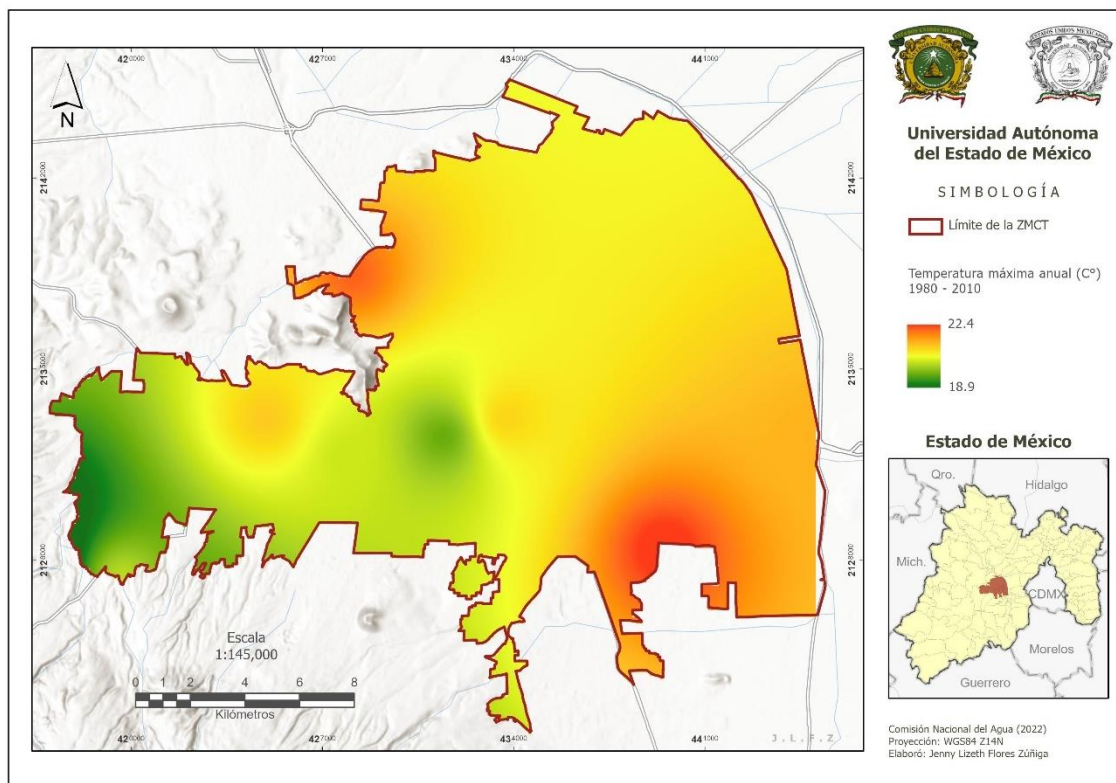
Fuente: Elaboración propia con base en la Comisión Nacional del Agua, 2022

Temperatura

También para esta variable se tomaron como referencia los datos de 13 estaciones meteorológicas de CONAGUA (2022) interpoladas anteriormente, estos datos también corresponden a un periodo de 30 años. La temperatura máxima anual promedio es de 22.4°C con mayor ocurrencia en zonas de Metepec y San Mateo Atenco y las menores desde 18.9°C (Figura 9).

Las estaciones meteorológicas miden la temperatura del aire, esta puede indicar islas de calor urbanas atmosféricas, pero no superficiales, ya que las superficiales están dadas por las variaciones de temperatura de los espacios edificados y el asfalto, es decir, a nivel superficies. De acuerdo con Ronco (2019) estos dos fenómenos se dan de manera simultánea: el efecto superficial y el de capa baja atmosférico. Además, durante el día la temperatura superficial puede tener variaciones más altas, pero en la noche presentan mayores similitudes.

Figura 9. Temperatura máxima anual en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca



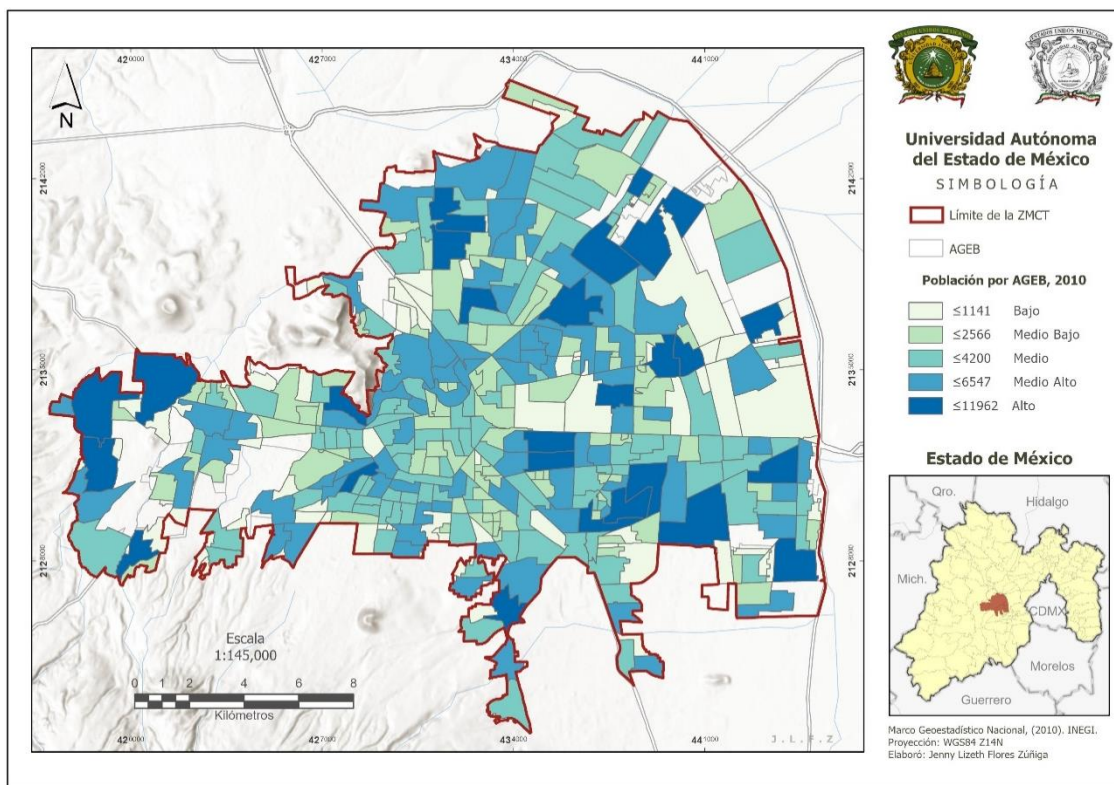
Fuente: Elaboración propia con base en la Comisión Nacional del Agua, 2022

3.1.2 Características Sociales

Debido a la falta de cartografía a nivel de Área Geoestadística Básica (AGEB) en específico del año 2000, se realizó el procesamiento sólo para los años 2010 y 2020. De acuerdo con la información censal de INEGI para el año 2010, se llegó hasta un valor máximo de 16,106 habitantes por AGEB urbana y la ZMCT contó con un total de 1,527,568 habitantes (Figura 10). Se identifica una distribución predominante en la zona norte, noreste y oeste que puede explicarse en función de los costos de vivienda, las plazas comerciales, industrias y polos de atracción de empleo en general por su cercanía a las vialidades que comunican la ZMCT.

Se buscó establecer un comparativo entre los dos periodos 2010 y 2020 para tener el comportamiento demográfico dentro de la zona de estudio como referencia adicional que permite integrar en materia de ciencia ambiental la parte social y temporal de la realidad abstraída en un modelo geográfico.

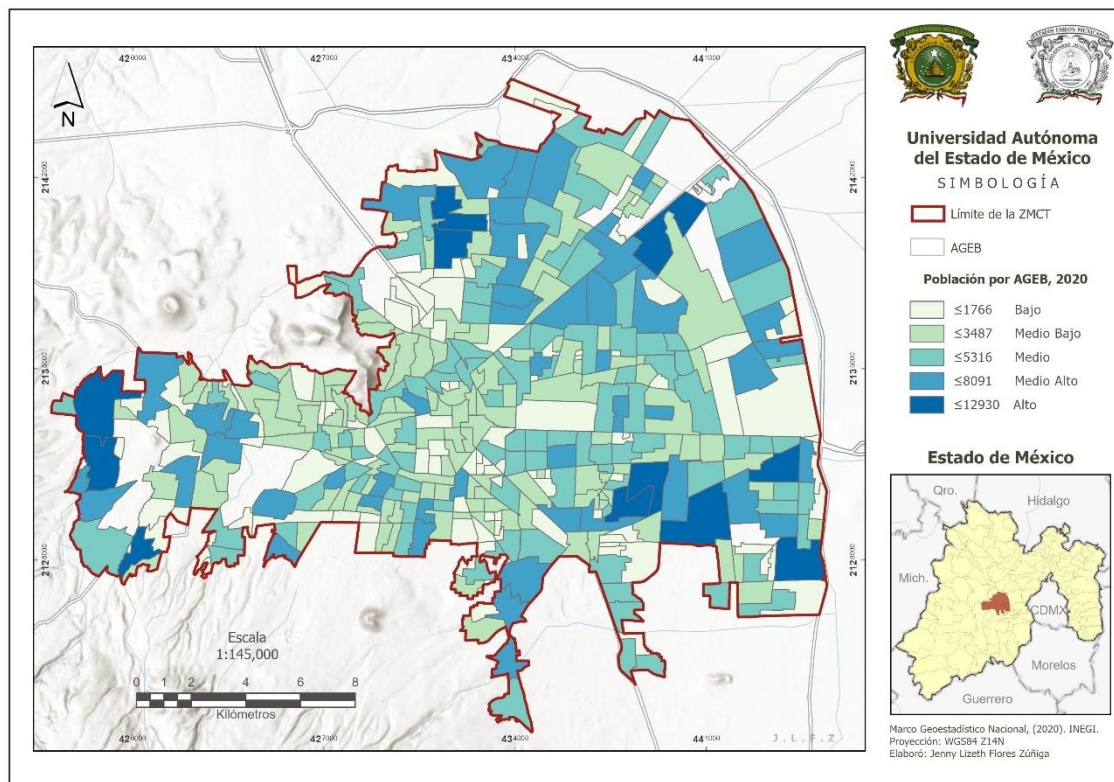
Figura 10. Población total por Área Geoestadística Básica, año 2010



Fuente: Elaboración propia con base en el Marco Geoestadístico Nacional, 2010

Respecto a los datos censales del año 2020 y el Marco Geoestadístico Nacional se identifican nuevos elementos espaciales de las AGEBs, es decir, zonas rurales que se convirtieron en urbanas y un decrecimiento en la población respecto al año 2010, además de una distribución mayormente uniforme en las AGEBs que comprenden sus valores desde 27 habitantes a 5,316 habitantes en cada AGEB (Figura 11).

Figura 11. Población total por Área Geoestadística Básica, año 2020



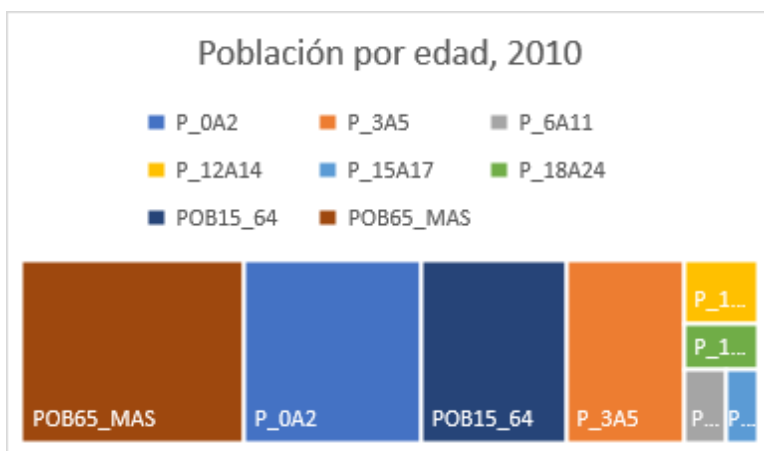
Fuente: Elaboración propia con base en el Marco Geoestadístico Nacional, 2020

Se enfatiza que durante el año 2020 hubo una disminución notable de las actividades económicas debido a la pandemia por el coronavirus (COVID-19) por lo tanto se consideran flujos migratorios internos que pudieron tener influencia en el total de 1,311,932 habitantes comparado con el 2010.

Población por género y edad

De acuerdo con el análisis dentro del límite de la ZMCT, en el año 2010 la población de género masculino fue de 990,468 hombres, mientras que la femenina fue de 537,100 mujeres. Para el año 2020, la población fue de 631,658 hombres y 680,272 mujeres (Figura 12).

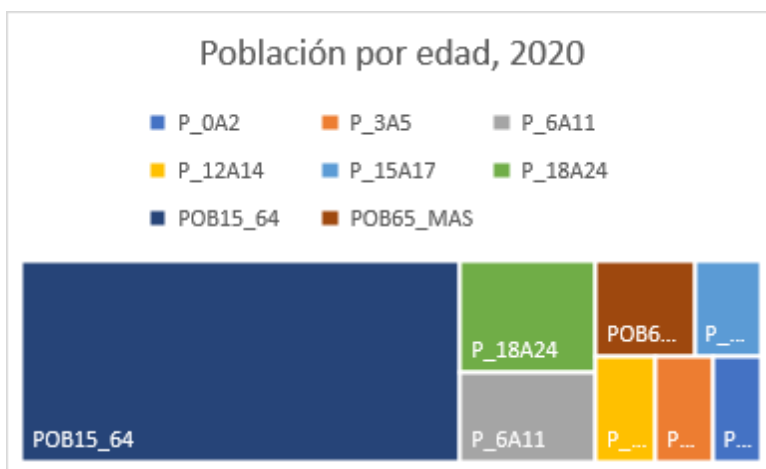
Figura 12. Comparación de la población por estratos de edad para el año 2010



Fuente: Elaboración propia con base en el Censo Nacional de Población y Vivienda, 2010.

En la figura 5 se pueden observar los estratos por edad durante el año 2010, donde la mayor parte de la población adulta se concentró arriba de los 65 años y la población más joven entre los 0 y 2 años.

Figura 13. Comparación de la población por estratos de edad para el año 2020



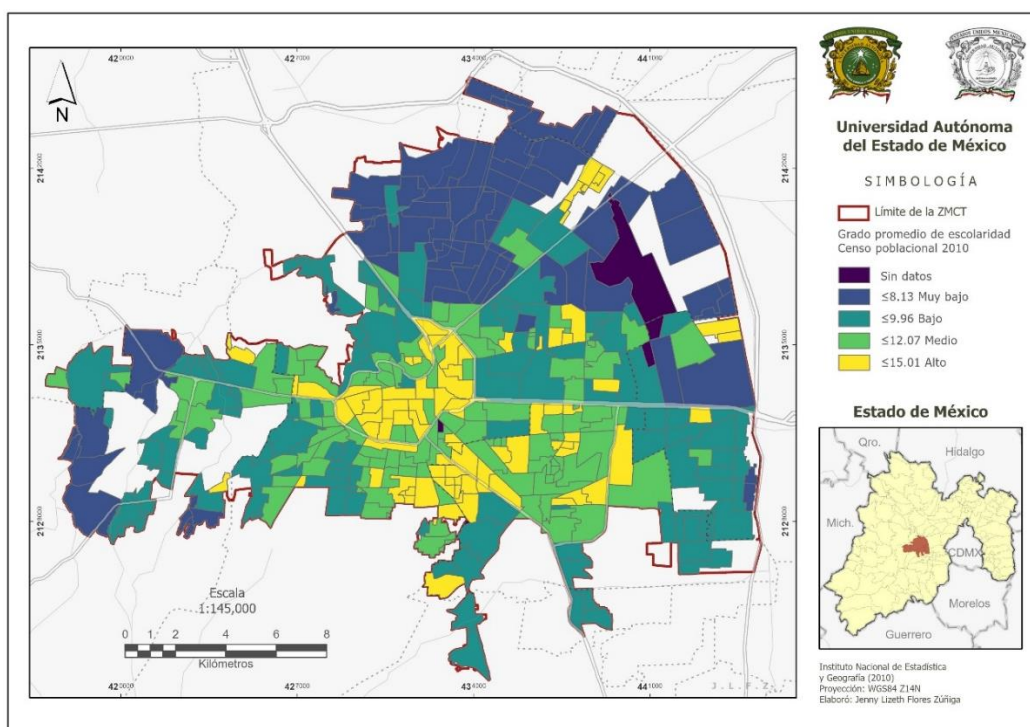
Fuente: Elaboración propia con base en el Censo Nacional de Población y Vivienda, 2020.

Durante el año 2020 se observa en la figura 6 un cambio en la estructura de la población, la mayor parte se encuentra entre los 15 y 64 años (Figura 13).

Educación

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía considera ciertos indicadores en el Censo Nacional de Población y Vivienda para medir la escolaridad de la población, uno de ellos que es representativo es el de grado promedio de escolaridad que resulta de dividir el monto de grados escolares aprobados por habitantes de entre 15 a 130 años entre las personas que pertenecen al mismo grupo de edad. No incluye a personas que no especificaron hasta qué grado aprobaron. (INEGI, 2020).

Figura 14. Grado promedio de escolaridad, año 2010

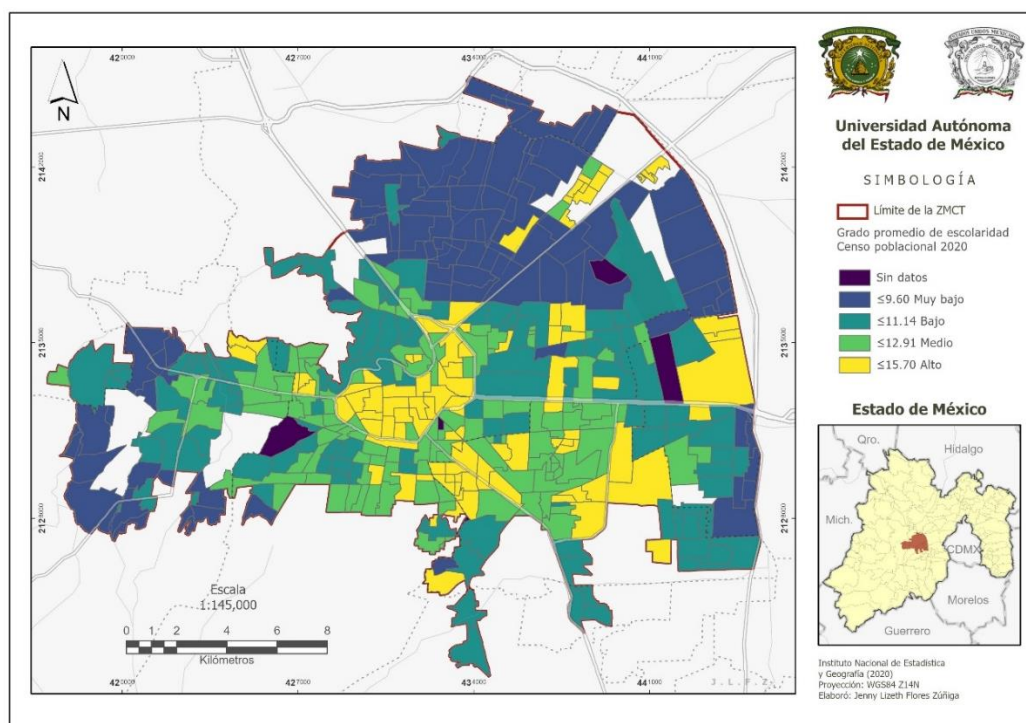


Fuente: Elaboración propia con base en el Marco Geoestadístico Nacional, 2010

En el Figura 14 se muestra el grado promedio de escolaridad por AGEB para el año 2010, donde los polígonos con tonalidades claras tienden a tener mayor escolaridad con un patrón más céntrico y en promedio el máximo llega hasta 15.01 que es hasta tercer año de universidad, algunos polígonos no contaron con información y los más bajos (en azul) quedan con escolaridades en promedio menores a 8.12, estos corresponden a la zona norte, noreste y oeste de la ZMCT.

Se tomó en consideración la variable de escolaridad porque está estrechamente relacionada con la calidad de vida de una población. Entre mayor es este indicador, las personas preferirán asentarse en las zonas urbanas y ser económicamente activas tanto en el sector secundario y mayormente en el sector de servicios (actividades terciarias), con lo que a su vez generarán aumento en la demanda de vivienda y consumo de bienes diversos. Dicha demanda y consumo se traduce en contaminación atmosférica la cual es más fuerte en presencia de islas de calor. (EPA, 2021)

Figura 15. Grado promedio de escolaridad, año 2020



Fuente: Elaboración propia con base en el Marco Geoestadístico Nacional, 2020

El grado promedio de escolaridad por AGEB en el año 2020 como se observa en el Figura 15, muestra un incremento de AGEBs hacia el este de la ZMCT mayor escolaridad en comparación del 2010 con un promedio de 15.70 el más alto (amarillo) y 9.60 o menos el más bajo (azul), este último aumentó 1.5 años, por lo que indica una tendencia a terminar la secundaria e ingresar al primer año de bachillerato.

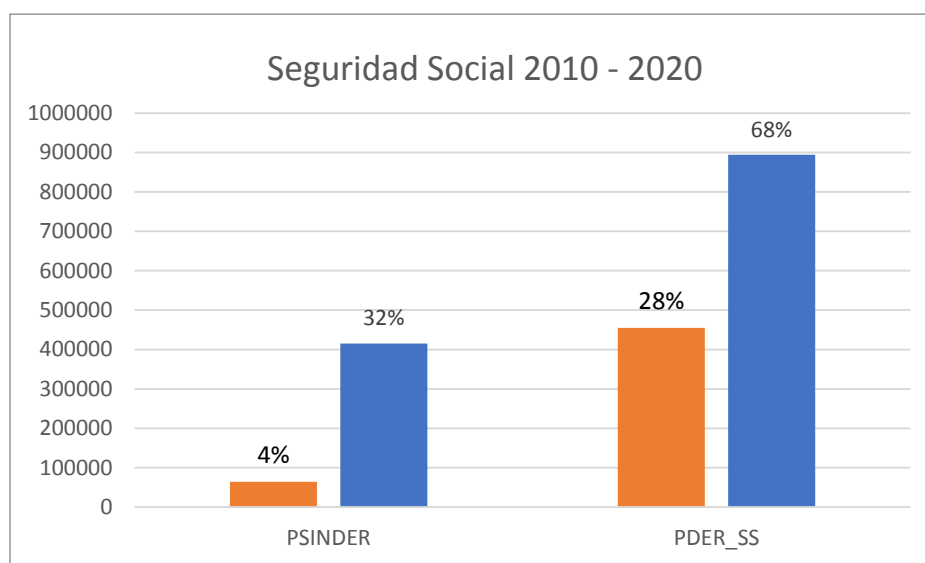
Salud

Es importante considerar a la población que está afiliada a servicios de salud y también aquella que no cuenta con dicha afiliación debido a que es la población que está en riesgo de no ser atendida por los efectos en su salud provocados a corto, mediano y largo plazo por la contaminación atmosférica, olas de calor e islas de calor. Estos valores contabilizan únicamente a la población que está dentro del límite de la ZMCT.

INEGI (2020) considera como derechohabientes el total de personas que están afiliadas a servicios médicos en alguna institución de salud pública o privada como: el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), el Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE e ISSSTE estatal), Petróleos Mexicanos (PEMEX), la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), la Secretaría de Marina Armada de México (SEMAR), el Instituto de Salud para el Bienestar (INSABI) o en otra.

De acuerdo con la figura 16, en el año 2010 (barras en naranja) el 4% de la población afirmó no estar afiliada a algún tipo de seguridad social o servicios médicos públicos y/o privados, para el mismo año sólo el 28% de la población total sí contó con acceso. Mientras que en el 2020 (azul) la población sin acceso representó el 32%, sin embargo, también se logró un aumento considerable del 68% para quienes afirmaron contar con los servicios de salud.

Figura 16. Comparación de acceso a seguridad social entre los años 2010 y 2020



Fuente: Elaboración propia con base en el Censo Nacional de Población y Vivienda, (2010:2020)

Economía

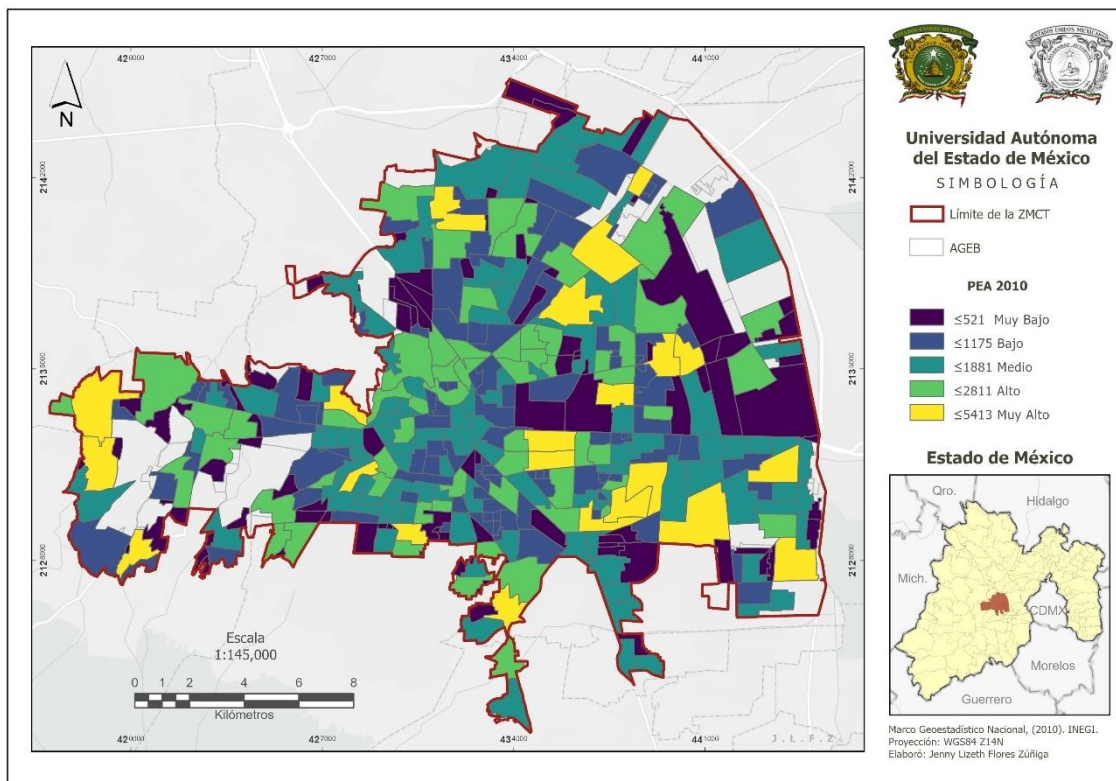
De acuerdo con INEGI (2020) la Población Económicamente Activa comprende a las personas de 12 a 130 años que trabajaron, tenían trabajo, pero no trabajaron o buscaron trabajo en la semana de referencia.

También denominada “fuerza de trabajo”, corresponde a la cantidad de personas que se encuentra en la etapa de la vida laborable o productiva. Es una parte de la población capaz de aportar bienes o servicios al mercado porque cumple con determinadas variables como rango de edad, nivel de instrucción, experiencia laboral, entre otras. Está conformada por dos grandes grupos:

Población ocupada. Aquella que tiene un trabajo.

Población desocupada. Es la parte de la población que no tiene empleo, pero se encuentra en la búsqueda activa. (Etecé, 2022)

Figura 17. Población Económicamente Activa en el año 2010

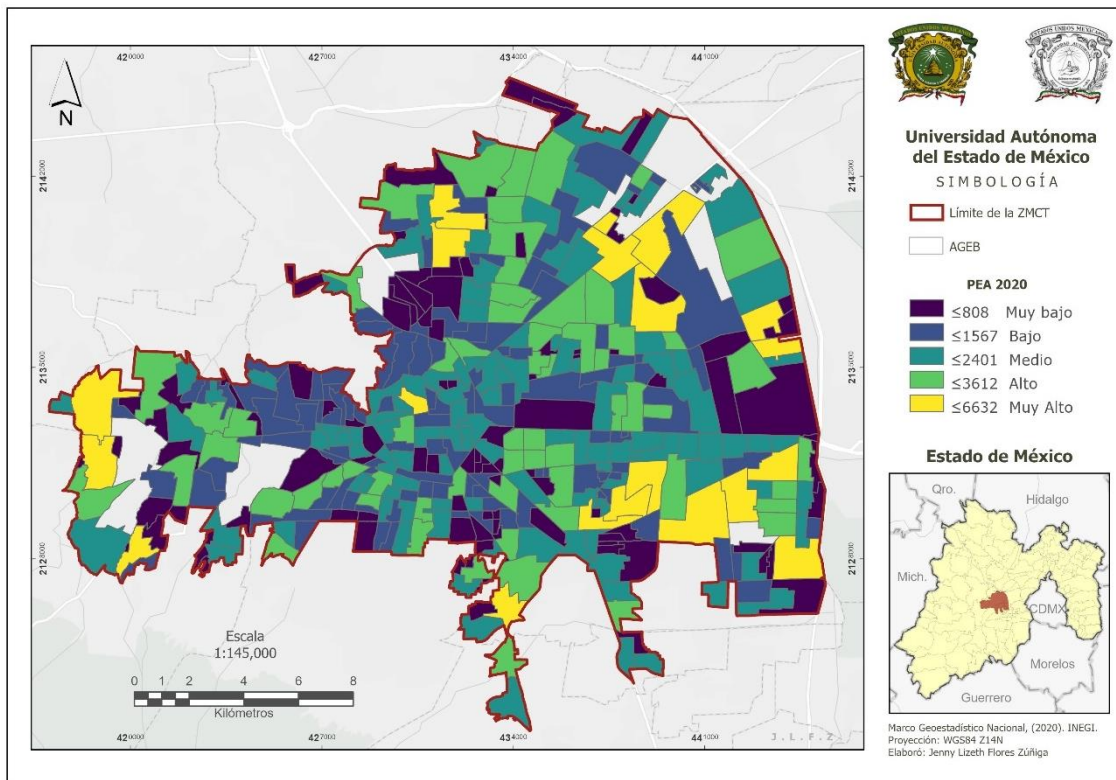


Fuente: Elaboración propia con base en el Marco Geoestadístico Nacional, 2010

En relación con la PEA por AGEB del año 2010 que se presenta en el Figura 17, esta llega hasta los 5413 habitantes (amarillo) en diferentes áreas de la ZMCT, como Metepec, Zinacantepec, San Mateo Atenco y norte de Toluca. Las AGEB con tonalidades oscuras son las que tienen una distribución irregular de menor cantidad de habitantes económicamente activos, que tienden a ser menores a 521 por AGEB.

Para el año 2020 (Figura 18), la PEA incrementa en la zona noreste y sureste de la ZMCT con un aumento de más de mil habitantes en las zonas de color amarillo respecto a la década anterior. Las de color verde claro tienen un aumento aproximado de 800 habitantes económicamente activos, se observa una distribución más uniforme y además para este periodo se cuenta con la inserción de nuevos polígonos AGEB reconocidos como urbanos por INEGI que proveen más datos detallados de la población que permiten mayor precisión en los datos.

Figura 18. Población Económicamente Activa en el año 2020

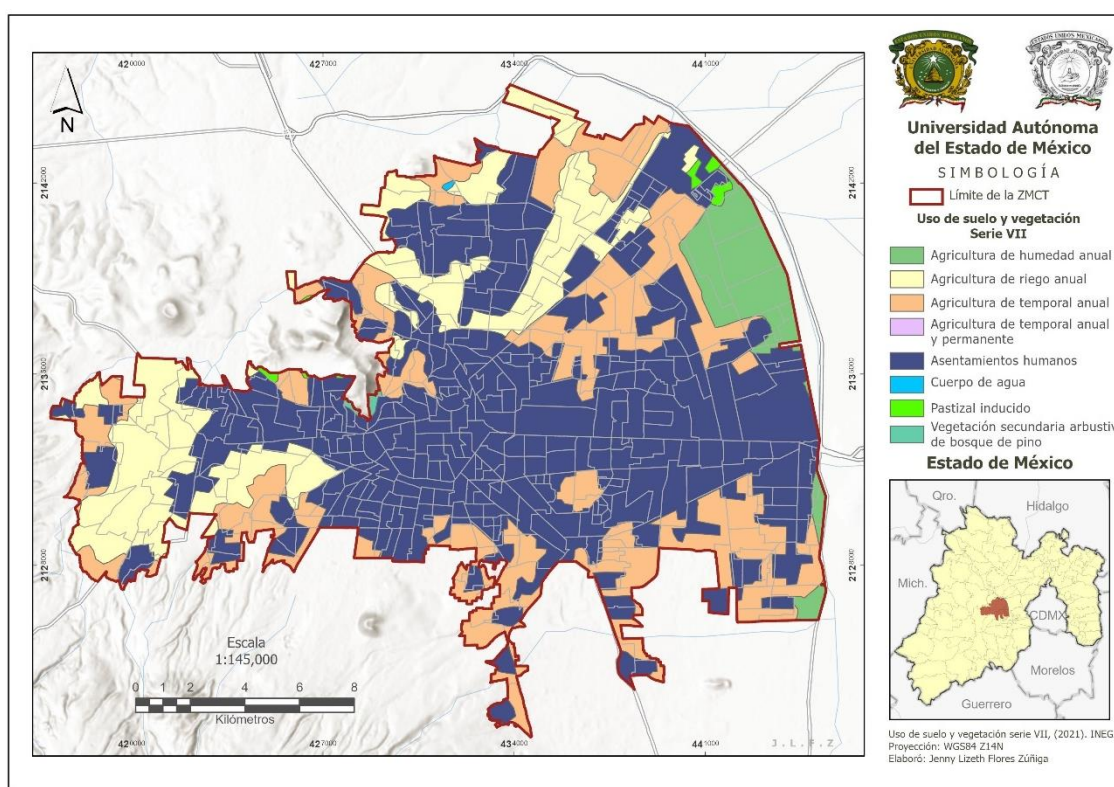


Fuente: Elaboración propia con base en el Marco Geoestadístico Nacional, 2020

Uso de suelo y Vegetación

De acuerdo con datos de Uso de Suelo y Vegetación Serie VII de INEGI, para el año 2021 en la ZMCT la vegetación predominante es de tipo pastizal inducido que sólo conforma una superficie de 1.3km² y para el uso de suelo los asentamientos humanos abarcan 180.5km², en segundo lugar, la agricultura de temporal anual con 75.7km² y en tercer lugar la agricultura de riego anual con 52.2km² respectivamente (Figura 19).

Figura 19. Uso de Suelo y Vegetación en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, 2021

La caracterización mediante uso de suelo y vegetación en una zona urbana permite identificar el desplazamiento de la vegetación y usos de suelo para agricultura por medio de la distribución de los asentamientos humanos; estos pueden ser indicativos relacionados a las islas de calor superficiales por tener su mayor incidencia en áreas construidas y actividad humana en los núcleos atractivos del sector industrial y de servicios.

3.2 Ubicación y cuantificación de las islas de calor y cálculo del Índice de Varianza del Campo Térmico Urbano o índice de confort climático el que ocurren en la ZMCT en el año 2020.

3.2.1 Ubicación y cuantificación de las islas de calor 2020.

Para comprender el comportamiento de las islas de calor urbanas de manera estacional y espacial, se elaboraron Figuras de intensidad en las cuatro estaciones del año; ya que se contó con la disponibilidad de las imágenes de satélite. En esta etapa se consideró el año 2020 debido a que la validación que se hace en campo busca corresponderse con los elementos urbanos más actuales y/o las condiciones que tienden a acentuar o disminuir la isla de calor.

Adicionalmente se calcularon las áreas en hectárea de los píxeles (dentro de la delimitación del polígono) para cada categoría de intensidad según el criterio de las clasificaciones de Fernández (1996) y Williams (2019), de esta forma se puede comparar el crecimiento o disminución de las superficies acorde con el cambio de estación.

Intensidad de islas de calor urbanas en invierno 2020

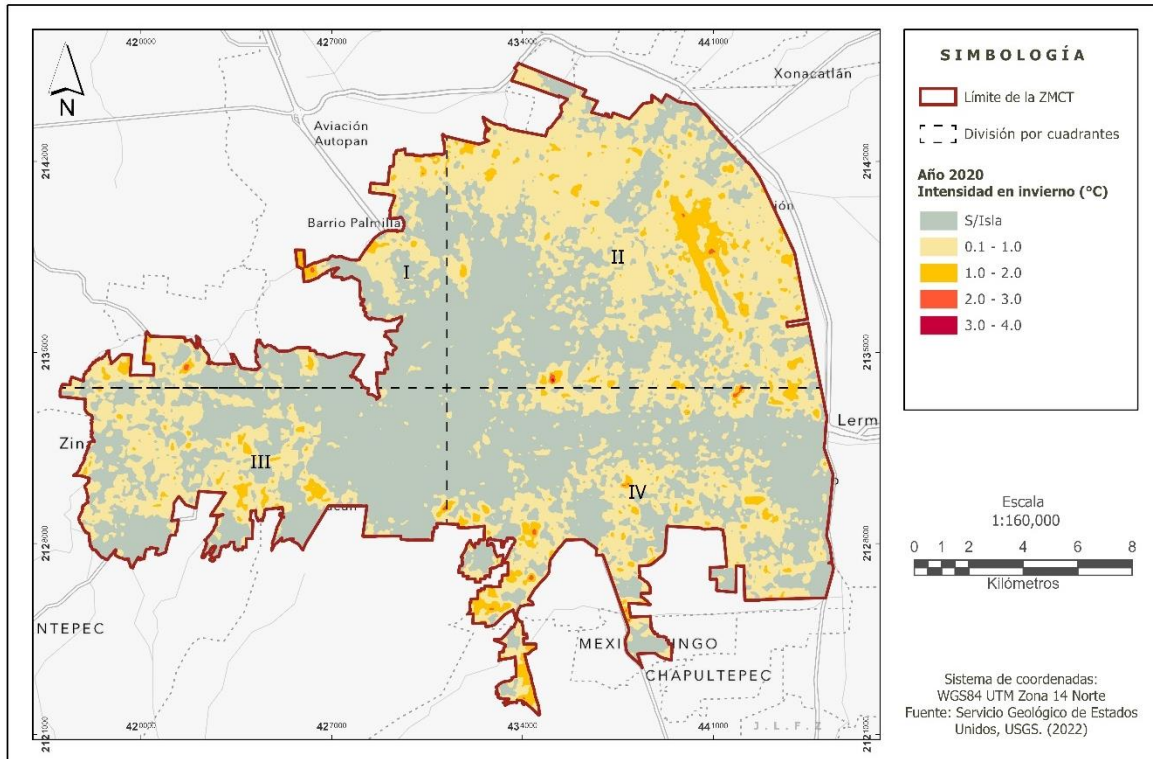
En el Figura 20 de invierno (17 de febrero), se identificaron islas de calor con intensidades de hasta 4°C en parques industriales, (zona norte en dirección a zona centro) comenzando por la planta de motores de General Motors en la colonia Santa Ana Tlapaltitlán que se identificó una intensidad de 3.1° a 4.0°C y en la planta de fundición de aluminio desde 1.1°C a 3.0°C.

En el mismo mes, (zona norte hacia el este) de la ZMCT se encuentra otra isla de calor en el parque *Lerma Park*, específicamente en unos centros de distribución que se encuentran sobre la Avenida de la Industria Automotriz con valores de 0.1°C gradualmente hasta llegar a 4.0°C de intensidad. Al noreste también se identificó sobre la pista del Aeropuerto Internacional de Toluca con intensidad de hasta 3°C. La Figura 8 representa los valores extraídos del área de cada píxel de la imagen de invierno y en cada rango de intensidad por hectárea directamente del software, los cuales se analizan cualitativa y cuantitativamente a continuación.

Los resultados muestran que en invierno 2020 la superficie sin isla de calor fue casi del 53% y muy débil con el 42% que sólo representa una variación del 0° a 1° C de intensidad, la

categoría débil con una variación de 1° a 2 °C de intensidad sólo representó casi el 5% de superficie, las demás categorías no tuvieron influencia (Tabla 13).

Figura 20. Intensidad de islas de calor urbanas en invierno durante el año 2020



Fuente: Elaboración propia, 2022

Tabla 13. Categorización de intensidad de islas de calor en invierno 2020

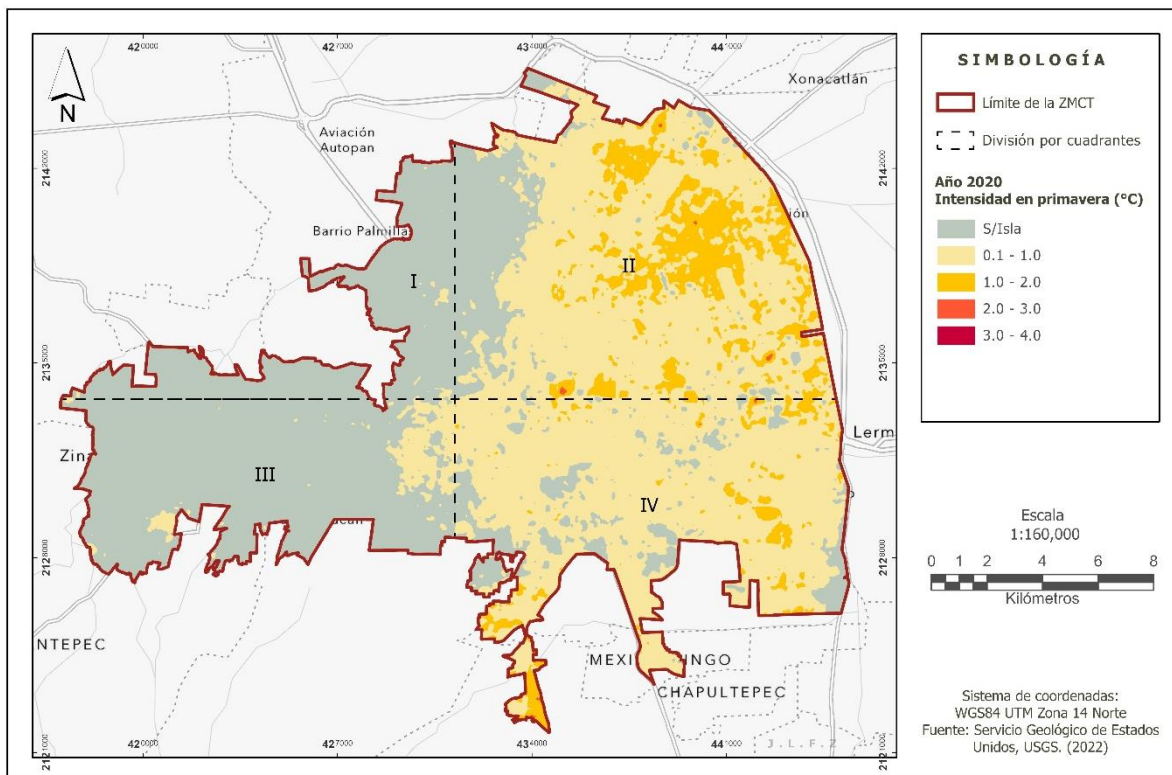
Rango de intensidad	Categoría	Área (ha)	%
<0	Sin isla	17,411.760	52.906
0° – 1°	Muy débil	13,934.520	42.341
1° – 2°	Débil	1,531.080	4.652
2° – 3°	Moderadamente débil	32.040	0.097
3° – 4°	Moderada	1.170	0.004
4° – 5°	Moderadamente fuerte	–	–
5° – 6°	Fuerte	–	–
6 y más	Muy fuerte	–	–
	Total	32,910.570	100.000

Fuente: Elaboración propia, 2023

Intensidad de islas de calor urbanas en primavera 2020

En el Figura 21 correspondiente a primavera (05 de abril), se identifica la misma isla de calor encontrada en invierno sobre la fábrica de General Motors en específico en la planta de motores con un rango parecido de intensidad desde 0.1° hasta 4.0°C , en el cual entre las dos plantas hay una zona lineal arbolada que corta la temperatura (que es la más baja en temperatura dentro de GM) y es más notable en la imagen de primavera. También sobre la planta de Infra aumenta el valor en primavera con un patrón contiguo hacia las plantas que están sobre la misma área en dirección al norte, aunque este llega hasta 3°C de intensidad.

Figura 21. Intensidad de islas de calor urbanas en primavera durante el año 2020



Fuente: Elaboración propia, 2022

Respecto al *Lerma Park*, la isla de calor en primavera persiste, aunque en menor intensidad y tiende a ser contigua hacia el este. En el caso del Aeropuerto Internacional de Toluca se mantiene en el mismo rango de intensidad, pero este (hasta 2°C) se distribuye en las colonias aledañas.

La Tabla 14 representa los valores extraídos del área de cada píxel de la imagen de primavera y en cada rango de intensidad por hectárea directamente del software, los cuales se analizan cualitativa y cuantitativamente a continuación.

Tabla 14. Categorización de intensidad de islas de calor en primavera 2020

<i>Rango de intensidad</i>	<i>Categoría</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>%</i>
<0	Sin isla	13,325.760	40.491
0° – 1°	Muy débil	16,680.330	50.684
1° – 2°	Débil	2,887.740	8.775
2° – 3°	Moderadamente débil	16.650	0.051
3° – 4°	Moderada	0.090	0.000
4° – 5°	Moderadamente fuerte	–	–
5° – 6°	Fuerte	–	–
6° y más	Muy fuerte	–	–
	Total		100.000

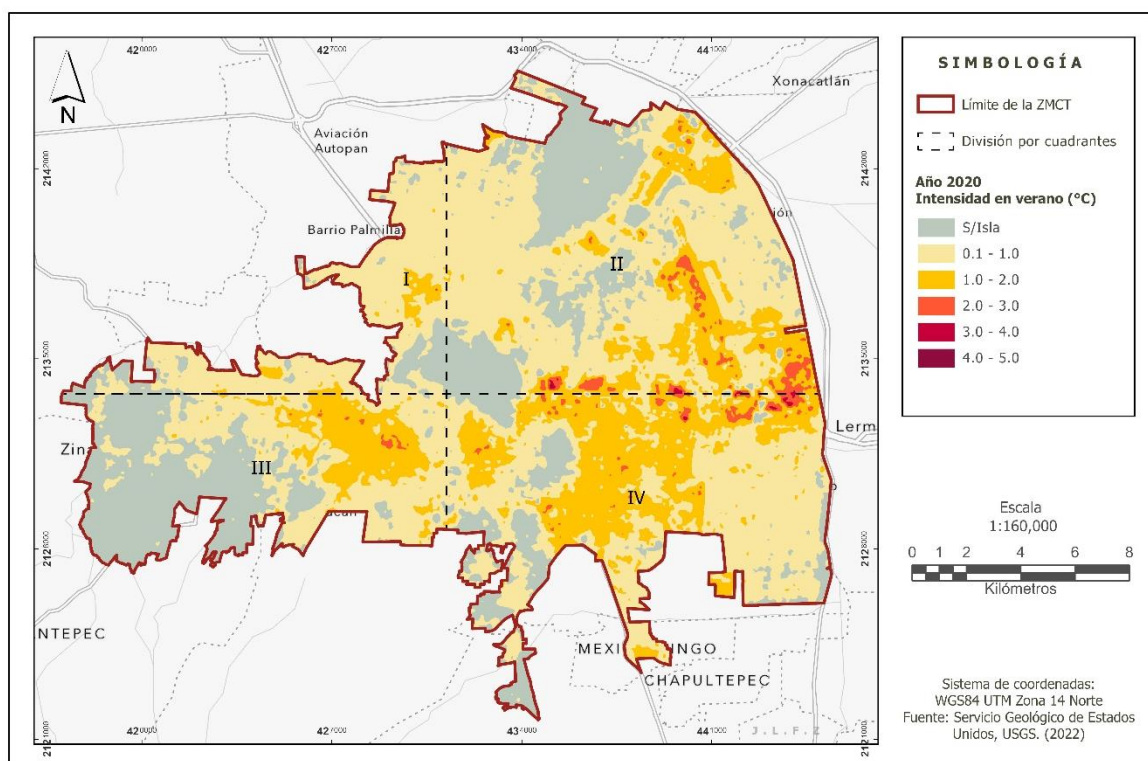
Fuente: Elaboración propia, 2023

Los resultados muestran que en primavera 2020 la superficie sin isla de calor disminuyó cerca del 13%, mientras que la categoría muy débil representó la mitad de la superficie de la ZMCT cerca del 51%, la cual llega hasta 1°C de intensidad. La categoría débil aumentó cerca del 4% su superficie con una variación de 1° a 2 °C de intensidad. La categoría moderadamente débil representó 16 hectáreas que respecto a las categorías anteriores no tiene mayor incidencia en cuanto a superficie, pero sí en las zonas encontradas descritas en la Figura 21.

Intensidad de islas de calor urbanas en verano 2020

En el Figura 22 correspondiente a verano (10 de julio) se identifican nuevas islas de calor, la Terminal de Toluca y el Mercado Juárez llegan hasta los 3°C de intensidad. También la colonia Plazas de San Buenaventura que está a un lado de Ciudad Universitaria también tiene una isla uniforme de hasta 3°C además de una parte lineal de la avenida Paseo Vicente Guerrero. Es notable que los asfaltos de estacionamientos en verano tienden a generar mayor intensidad (MEGA Soriana y Walmart en Zinacantepec) y también sobre la pista del Aeropuerto aumenta hasta 3°C con mayor uniformidad respecto a las estaciones anteriores. Igualmente se identifica una isla de máximo 3°C sobre Femsa Coca-Cola Zinacantepec.

Figura 22. Intensidad de islas de calor urbanas en verano durante el año 2020



Fuente: Elaboración propia, 2022

Sobre GM la isla se intensifica hasta los 5.0°C en la planta de motores y la planta de fundición aumenta de 2.1°C a 3.0°C, además de que en los alrededores de la zona industrial se generan nuevas islas con intensidad de hasta 3.0°C (Nestlé, Bosch, Grupo TYT, Coca-Cola Pilares, entre otras). Por la zona industrial El Coecillo se identifican nuevas islas con intensidad de hasta 3.1° y 4.0°C, los 3.0°C corresponden al fraccionamiento Los Héroes II y III. La isla

que se intensifica cerca de la zona es sobre la planta Infra que llega hasta los 4.0°C en comparación con las estaciones anteriores.

En *Lerma Park* se intensifica y se generan nuevas islas de hasta 4.0°C incluyendo Barcel, el corredor industrial de Lerma y el Cerrillo en general. También los fraccionamientos cerca de estas zonas industriales y al noreste nuevas islas por el Parque Industrial Toluca 2000 (San Blas Oztacatipan) que presentan intensidades de hasta 3.0°C. En general gran parte de las zonas habitacionales y fraccionamientos tienen islas uniformes de 0.1° hasta 2.0°C en su mayoría y 3°C en casos aislados.

En la Tabla 15 se representan los valores extraídos del área de cada píxel de la imagen en cada rango de intensidad por hectárea correspondientes a la imagen de verano 2020, los cuales se analizan cualitativa y cuantitativamente a continuación. La categoría sin isla disminuyó un 15% en comparación con la estación de primavera, en consecuencia, las siguientes categorías aumentaron.

La categoría muy débil aumentó 2% (638.8 hectáreas), mientras que la categoría débil aumentó un 12% (3,864.3 hectáreas) donde corresponde una intensidad desde 1°C a 2°C. También la categoría moderadamente débil con variaciones de 2°C a 3°C de intensidad comienza a tener mayor influencia con un aumento cerca del 1.5% (469.1 hectáreas), la categoría moderada no tuvo influencia y en las demás no hubo registro.

Tabla 15. Categorización de intensidad de islas de calor en verano 2020

<i>Rango de intensidad</i>	<i>Categoría</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>%</i>
<0	Sin isla	8,293.348	25.225
0° – 1°	Muy débil	17,319.168	52.678
1° – 2°	Débil	6,752.115	20.537
2° – 3°	Moderadamente débil	485.796	1.478
3° – 4°	Moderada	26.269	0.080
4° – 5°	Moderadamente fuerte	0.630	0.002
5° – 6°	Fuerte	–	–
6° y más	Muy fuerte	–	–
	Total		100.000

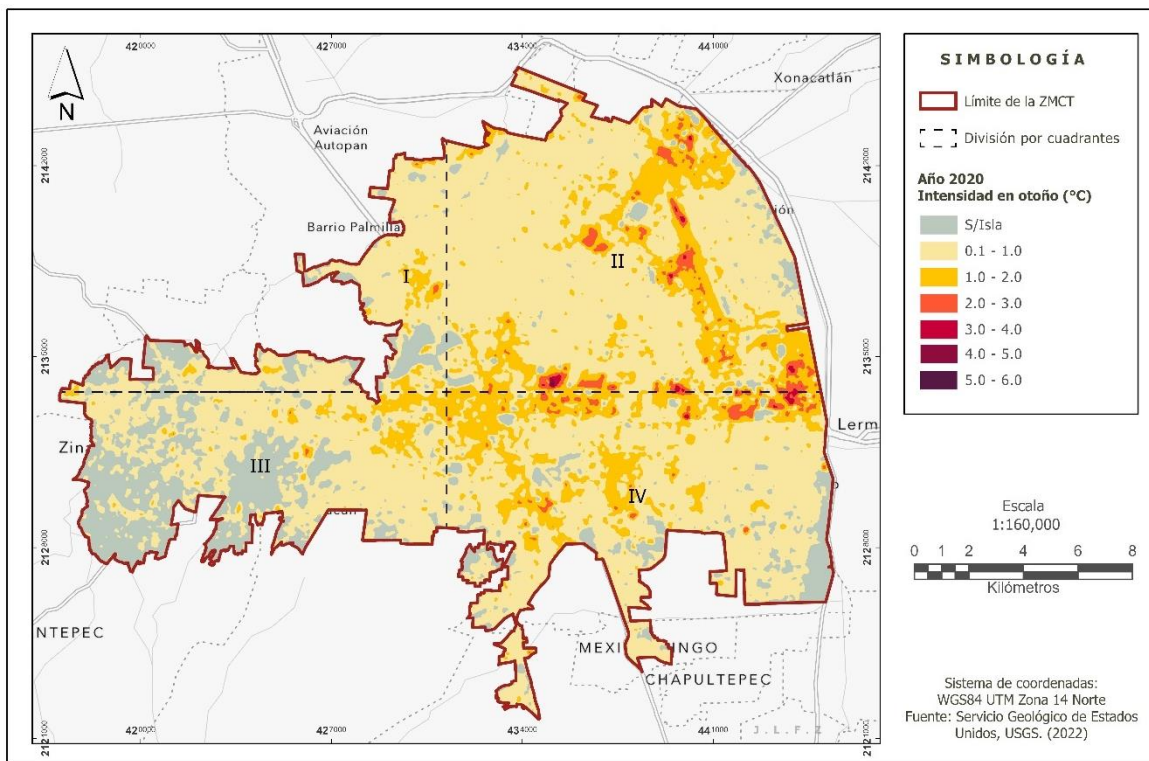
Fuente: Elaboración propia, 2023

Intensidad de islas de calor urbanas en otoño 2020

Correspondiente a otoño (15 de noviembre), en el Figura 23 se muestran las islas de calor, donde se generó una nueva isla sobre la zona centro de Toluca que inicia desde 0.1°C hasta 2.0°C, el punto con mayor temperatura se encuentra sobre el centro comercial llamado “Grand Plaza”. La isla identificada en la estación anterior (verano) sobre Mercado Juárez (zona centro) se mantiene en la misma intensidad y la de la Terminal (zona centro) disminuyó un grado y se observa uniforme sobre los 2.0°C.

Respecto a los parques industriales mencionados en verano las islas de calor persisten cerca de los mismos valores identificados, aunque en algunos puntos de la zona del Parque Industrial Toluca 2000 (cerca de los límites del noreste) es notable el aumento en intensidad en comparación con las demás estaciones.

Figura 23. Intensidad de islas de calor urbanas en otoño durante el año 2020



Fuente: Elaboración propia, 2022

En la Tabla 16 se representan los valores extraídos del área de cada píxel de la imagen en cada rango de intensidad por hectárea correspondientes a la imagen de otoño 2020, los cuales se analizan cualitativa y cuantitativamente a continuación.

Tabla 16. Categorización de intensidad de islas de calor en otoño 2020

<i>Rango de intensidad</i>	<i>Categoría</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>%</i>
<0	Sin isla	4,942.800	15.019
0° – 1°	Muy débil	21,935.610	66.652
1° – 2°	Débil	5,396.940	16.399
2° – 3°	Moderadamente débil	582.210	1.769
3° – 4°	Moderada	48.690	0.148
4° – 5°	Moderadamente fuerte	3.420	0.010
5° – 6°	Fuerte	0.900	0.003
6° y más	Muy fuerte	–	–
	Total		100.000

Fuente: Elaboración propia, 2023

La categoría sin isla disminuyó un 10% en comparación con la estación de verano, (disminución que representa 3,350.5 hectáreas) debido a esto, las siguientes categorías mostraron un aumento:

La categoría muy débil aumentó un 14% (4,616.45 hectáreas) y representa más de la mitad de superficie de la isla de calor por tener el 66.6% de 0°C a 1°C de intensidad, mientras que la categoría débil al tener 16.3% de 1° a 2°C de intensidad disminuyó 4.1% (1,355.17 hectáreas) respecto a verano. La categoría moderadamente débil cerca del 1.8% con intensidades de 2°C a 3°C se mantiene parecida a la estación anterior, aunque tuvo un aumento de 96.42 hectáreas (aumento cerca del 0.3%). la categoría moderada no tuvo influencia y en las demás no hubo registro.

En resumen, las estaciones donde se presentó un menor efecto de intensidad de islas de calor fueron en invierno y primavera, debido a que la primera característica que lo determina es la cantidad de categorías encontradas, en las dos estaciones fueron solamente cuatro categorías con intensidad de 0.1°C hasta 4°C, pero en la mayor superficie se encontró entre 0.1°C a 2°C siendo una intensidad generalmente débil. Las estaciones con mayor efecto de intensidad fueron verano (cinco categorías) y otoño (seis categorías) con intensidades desde 0.1°C hasta 6.0°C.

Análisis comparativo de la intensidad de islas de calor en las cuatro estaciones del año 2020.

A continuación, en la tabla 17 se observa la intensidad de las islas de calor en las diferentes estaciones del año 2020. La estación donde se presentaron islas de calor más fuertes (de 5° a 6°C) fue en otoño con 0.003% del área total, mientras que las estaciones donde se encontraron islas de calor moderadamente fuertes (entre 4°C y 5 °C) se encontraron en verano y otoño con 0.002% y 0.010% del área total.

Categorías moderadas y débiles se presentaron en las cuatro estaciones: moderada (entre 3°C a 4°C) en 0.004 a 0.148% del área, la máxima en otoño; moderadamente débiles (entre 2°C a 3°C) de 0.097 a 1.769% del área, la máxima en otoño; débiles (entre 1°C a 2°C) en 4.652 a 20.537% la máxima en verano; muy débiles (entre 0°C a 1°C) en 42.341% y 66.652% con la máxima en otoño. Las superficies sin islas de calor (menores a 0°C) se presentaron en otoño la mínima con 15.019% y la máxima en invierno con 52.906%.

Se destaca que la estación con mayor superficie de isla de calor (temperaturas superiores a 0°C) fue en otoño con 84.981%, seguida de verano con 74.775%, primavera con 59.51% e invierno con 47.094% respecto al total de la superficie en cada estación.

Tabla 17. Intensidad de islas de calor en las estaciones del año 2020

<i>Rango de intensidad</i>	<i>Categoría</i>	<i>Invierno Área (%)</i>	<i>Primavera Área (%)</i>	<i>Verano Área (%)</i>	<i>Otoño Área (%)</i>
<0°	Sin isla	52.906	40.491	25.225	15.019
0° – 1°	Muy débil	42.341	50.684	52.678	66.652
1° – 2°	Débil	4.652	8.775	20.537	16.399
2° – 3°	Moderadamente débil	0.097	0.051	1.478	1.769
3° – 4°	Moderada	0.004	0.000	0.080	0.148
4° – 5°	Moderadamente fuerte	–	–	0.002	0.010
5° – 6°	Fuerte	–	–	–	0.003
6 y más	Muy fuerte	–	–	–	–
	Total (0°>)	47.094	59.51	74.775	84.981

Fuente: Elaboración propia, 2023

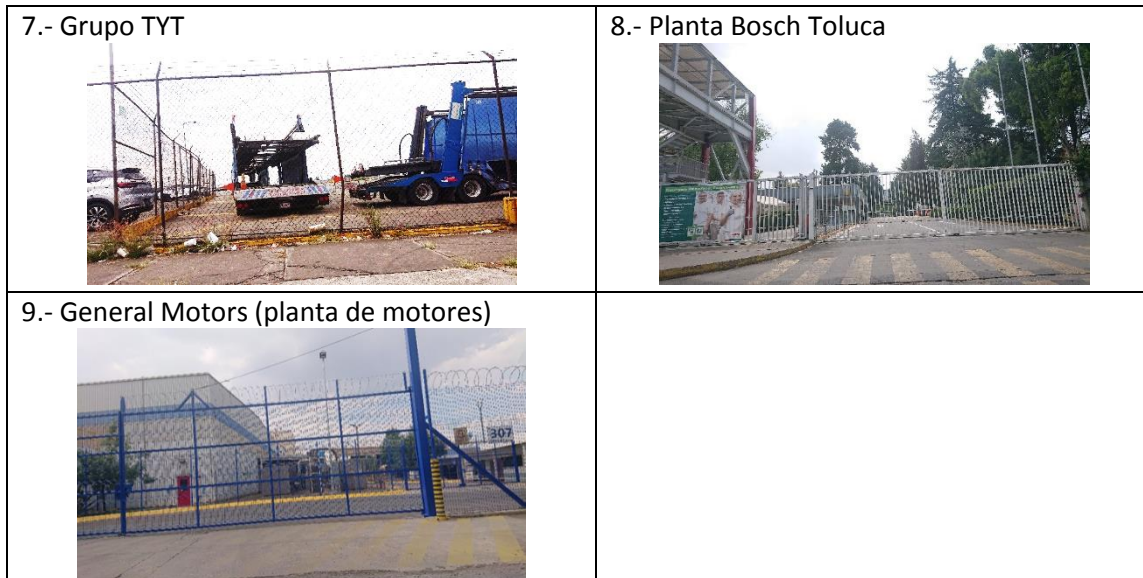
3.2.1.1 Observación de campo

Con base en los resultados de las mediciones de la intensidad de la isla de calor, se llevó a cabo una observación de campo el 8 de abril (primavera) entre las 12 y las 2 pm en lugares donde se había observado mayor intensidad durante las cuatro estaciones. El objetivo fue determinar las características físicas que inciden en la formación de islas de calor urbanas y la relación con la presencia o ausencia de vegetación.

En las observaciones se identificaron características específicas de los estacionamientos, como superficies de asfalto y concreto y edificios de colores claros con techos de aluminio. En cuanto a la vegetación, las observaciones mostraron pequeños arbustos y árboles dispersos con disimilitud en establecimientos cercanos. A diferencia de los sitios visitados, la Planta BOSCH Toluca fue el único lugar que exhibió la presencia más significativa de vegetación, como se muestra en la Figura 24 (consultar anexo para mayor visibilidad de las fotografías).

Figura 24. Observación de campo

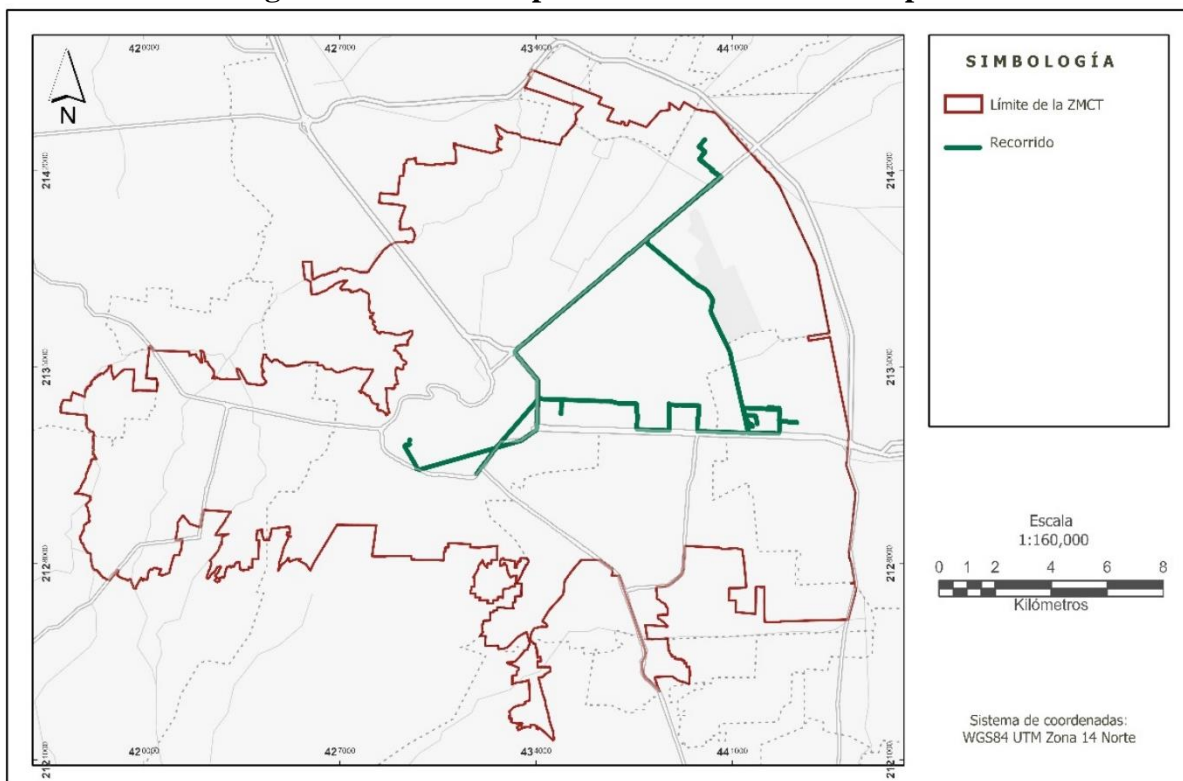




Fuente: elaboración propia, 2023.

En la Figura 25, se observa el recorrido que se realizó en los lugares donde se presentó mayor intensidad de islas de calor urbanas con apoyo del registro de la ruta GPX.

Figura 25. Recorrido para la observación de campo



Fuente: elaboración propia, 2023.

3.2.2 Ubicación y cuantificación del Índice de Varianza del Campo Térmico Urbano (UTFVI) en el año 2020.

Se calculó el índice de varianza de campo térmico urbano (UTFVI) para identificar cualitativa y cuantitativamente la capacidad de confort climático y vulnerabilidad urbana por el efecto de islas de calor en la ZMCT.

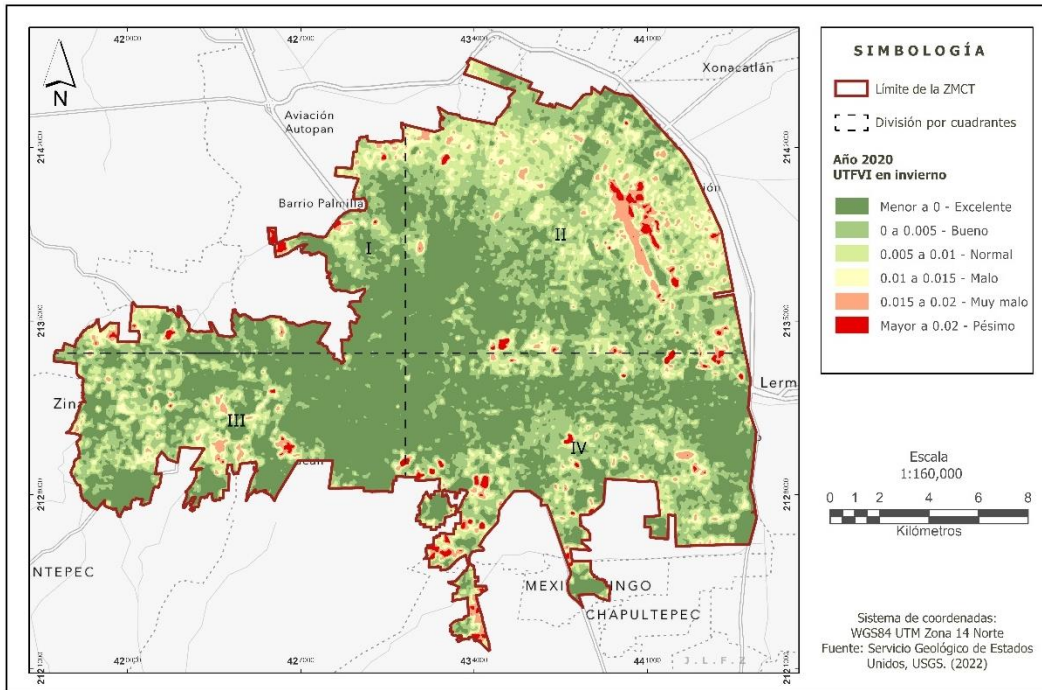
UTFVI en invierno 2020

En el cuadrante I del Figura 26, se identificaron zonas con áreas de mal confort térmico que presentan valores desde 0.01 y que llegaron hasta 0.02 o bien sobrepasaron este valor, esto en dirección hacia el suroeste, este y norte, mientras que en dirección al sureste estos valores representan un mejor confort térmico, sobre esta zona se encuentra el Bosque de la Mora. En el caso del cuadrante II, se aprecian valores que no son óptimos para el confort térmico, siendo la zona del aeropuerto y alrededores que se encuentra al este, también en el sur se ubican algunas áreas sobre zonas industriales que llegan o sobrepasan el valor 0.02 y a su alrededor se tiene una tendencia a disminuir el malestar térmico, caso contrario del norte y noroeste principalmente, donde la mayor parte de las áreas oscilan entre 0.005 a 0.01 considerado como normal, pero alcanza hasta el 0.02 siendo pésimo confort.

El cuadrante III conserva valores excelentes de confort térmico por ser menores a cero en dirección al este y noreste, pero hacia el sur hay algunas áreas que llegan hasta 0.02 y en dirección al oeste se distribuyen varias zonas con valores aceptables de confort térmico, y oscilaron principalmente entre 0.005 (normal) hasta 0.015 (malo). En relación con el cuadrante IV se identificaron varios puntos de malestar térmico principalmente pésimo hacia el suroeste y algunos en el centro, así como los que comparte con el cuadrante II. Las zonas que presentaron mejor confort térmico se encontraron en dirección hasta el noroeste y este, por tener valores principalmente excelentes a normales los cuales son menores a cero y llegan hasta 0.01.

En términos generales, los cuadrantes que presentaron mayor cantidad de zonas con valores de menor confort térmico son los II y IV. Este resultado demuestra que en esta estación el concreto de zonas habitacionales no presenta mayor efecto de albedo, mientras que el asfalto y las zonas industriales (identificadas en el 3.2.1) sí generan malestar térmico.

Figura 26. Distribución espacial del confort térmico (UTFVI) en invierno 2020



Fuente: Elaboración propia, 2022

Tabla 18. Categorización de UTFVI para invierno 2020

<i>Rango UTFVI</i>	<i>Índice de varianza del campo térmico urbano (UTFVI)</i>	<i>Nivel de confort térmico urbano</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>%</i>
<i>Menor a 0</i>	Ninguno	Excelente	14,529.870	44.150
<i>0 a 0.005</i>	Débil	Bueno	9,176.130	27.882
<i>0.005 a 0.01</i>	Medio	Normal	5,574.420	16.938
<i>0.01 a 0.015</i>	Fuerte	Malo	2,344.860	7.125
<i>0.015 a 0.02</i>	Muy fuerte	Muy malo	943.290	2.866
<i>Mayor a 0.02</i>	Fortísimo	Pésimo	342.000	1.039
Total				100.000

Fuente: Elaboración propia, 2023

Los resultados de la Tabla 18 muestran que el 44% de la superficie tiene excelente confort térmico, 28% es bueno y 17% es normal, por lo tanto, la mayor parte de la superficie de la ZMCT mostró ser confortable en la estación de invierno. Mientras que el 4% de la superficie presentó niveles de confort muy malos.

UTFVI en primavera 2020

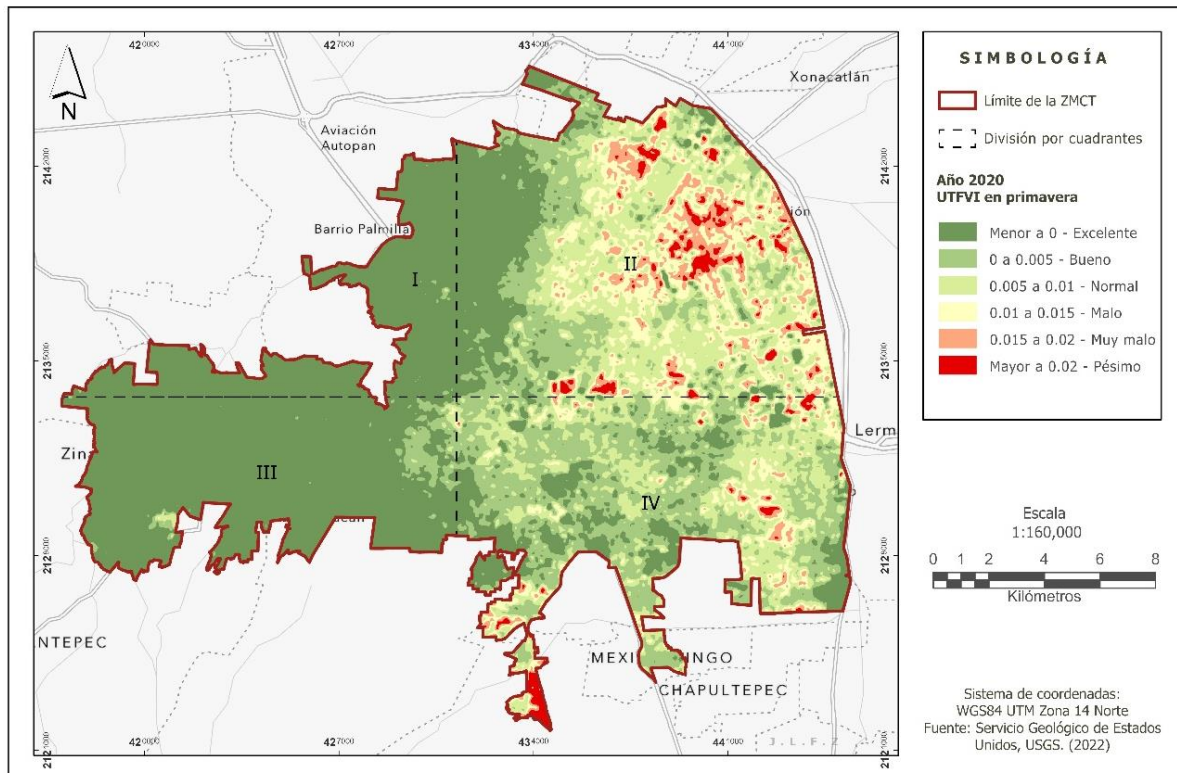
El cuadrante I del Figura 27 muestra excelente confort térmico casi en la totalidad del área debido a que el índice UTFVI es menor a 0, llegando máximo hasta niveles normales en zonas puntuales en dirección al este del cuadrante. En relación con el cuadrante II, se presentaron grandes áreas con confort térmico muy malo por tener valores de 0.01 a 0.02 o más en dirección al norte, este, centro y sur, principalmente en fraccionamientos, zona del Aeropuerto y alrededores, las zonas con buen confort térmico se encontraron mayormente hacia el oeste contiguas al cuadrante I.

Se observaron patrones similares en el cuadrante III en relación con el cuadrante I, debido a que casi la mayor parte de este cuadrante también tuvo valores excelentes de confort térmico al ser menores a 0, solamente hacia el este y suroeste se encontraron valores que llegaron a ser considerados por la categorización como buenos y normales, sólo una pequeña área en dirección al noroeste tuvo valores de mal confort térmico. En el cuadrante IV se distribuyeron zonas de mal confort térmico en dirección al noreste, suroeste y este, mientras que la mayor parte de las áreas de este cuadrante se consideraron como excelentes a normales principalmente en el centro, sur y oeste.

Similarmente con la estación de invierno, los cuadrantes que presentaron mayor cantidad de zonas con valores de menor confort térmico fueron los II y IV. De forma general, se puede decir que en esta estación sólo las zonas que se localizan cerca de zonas industriales, el aeropuerto y algunos fraccionamientos tienen una tendencia a presentar un mal confort térmico.

La Tabla 19 muestra los resultados de las categorías por hectárea y sus porcentajes del UTFVI para primavera 2020, donde la categoría de nivel excelente se mantuvo de forma similar en relación con la estación de invierno, el nivel bueno disminuyó cerca del 7% y el nivel normal aumentó 2%. Las categorías de bajo confort térmico como el malo, aumentó cerca del 4%, el muy malo aumentó más del 1% y el pésimo se mantuvo similar a la estación de invierno con un valor cerca del 1.5%.

Figura 27. Distribución espacial del confort térmico (UTFVI) en primavera 2020



Fuente: Elaboración propia, 2022

Tabla 19. Categorización de UTFVI para primavera 2020

<i>Rango UTFVI</i>	<i>Índice de varianza del campo térmico urbano (UTFVI)</i>	<i>Nivel de confort térmico urbano</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>%</i>
<i>Menor a 0</i>	Ninguno	Excelente	14,350.500	43.608
<i>0 a 0.005</i>	Débil	Bueno	6,889.140	20.934
<i>0.005 a 0.01</i>	Medio	Normal	6,255.090	19.008
<i>0.01 a 0.015</i>	Fuerte	Malo	3,554.370	10.801
<i>0.015 a 0.02</i>	Muy fuerte	Muy malo	1,368.810	4.159
<i>Mayor a 0.02</i>	Fortísimo	Pésimo	490.230	1.490
		Total		100.000

Fuente: Elaboración propia, 2023

UTFVI en verano 2020

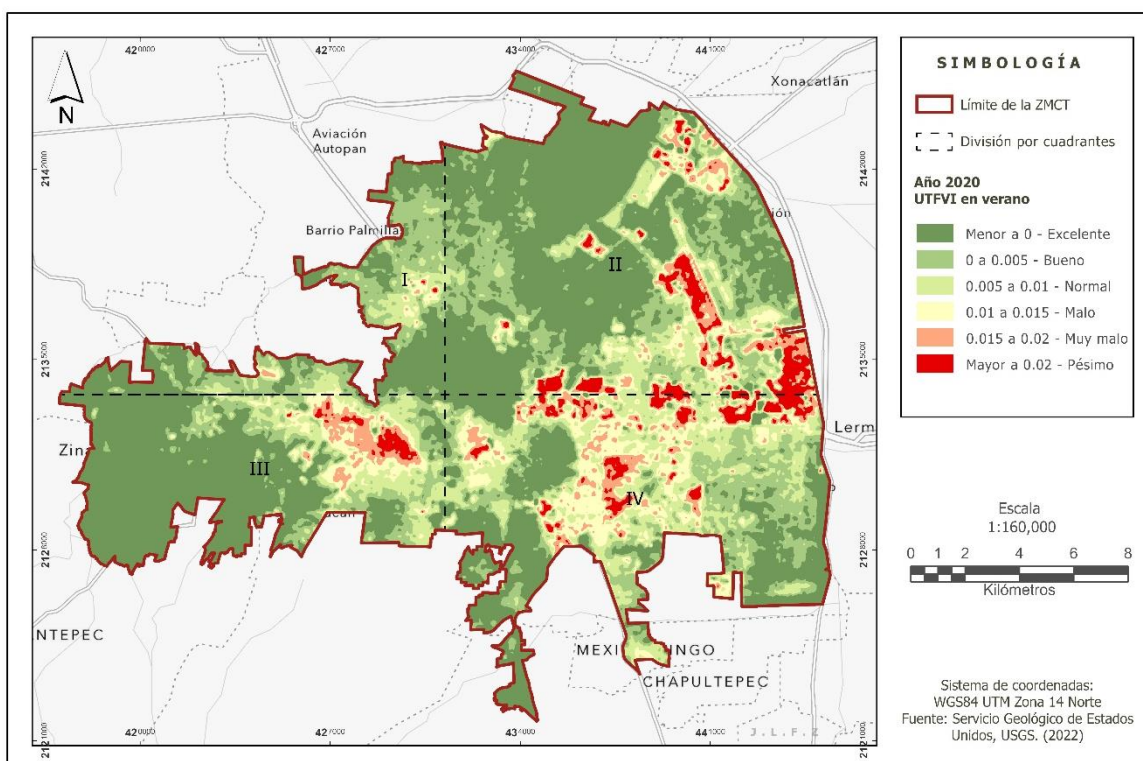
En el primer cuadrante del Figura 28 se aprecia una disminución de los buenos niveles de confort térmico que se encontraron en las estaciones de invierno y primavera, ya que hacia el este hay zonas que llegan hasta los valores considerados como malos a pésimos, en el sureste disminuyen dando lugar a valores de confort térmico excelentes, mientras que en dirección al sur se identifican normales a muy malos, debido a que no sobrepasaron el valor de 0.02. En el segundo cuadrante se nota una mayor distribución y amplitud de zonas con valores de pésimo confort térmico hacia el sur y sureste sobre las zonas industriales, además del Aeropuerto, centro y noreste del cuadrante.

En el tercer cuadrante se observa una área con distribución uniforme de valores de confort malos a pésimos en dirección al noreste, mientras que en el centro, sur, oeste y noroeste se presentaron valores de excelente confort térmico. En relación con el cuarto cuadrante se identifican varias zonas de valores malos a pésimos de confort térmico que se encuentran en el norte contiguas al segundo cuadrante, por localizarse sobre las mismas zonas industriales. También se presentaron valores malos a pésimos en el centro y en el noroeste, mientras que, hacia el sur y el este, los valores de confort térmico llegaron a ser de normales a excelentes.

Aunque los cuadrantes que presentaron mayor cantidad de zonas con valores de confort térmicos muy malos a pésimos son los mismos que en invierno y primavera (II y IV), es en esta estación donde este efecto tiende a distribuirse con mayor uniformidad además de presentarse en el cuadrante III. También este efecto en esta estación siguió un patrón en los valores de confort térmicos muy malos a pésimos sobre el trazado urbano y áreas cercanas a las avenidas principales.

La tabla 20 muestra los resultados de las categorías por hectárea y sus porcentajes del UTFVI para verano 2020, donde la categoría de nivel excelente aumentó cerca del 3%, el nivel bueno se mantuvo de forma similar en relación con la estación de primavera y el nivel normal disminuyó 4%. Entre las categorías consideradas de mal confort térmico, en área la mala disminuyó 1%, la muy mala se mantuvo similar con un aumento del 0.6% y la pésima aumentó cerca del 2% (valores comparados con la estación anterior).

Figura 28. Distribución espacial del confort térmico (UTFVI) en verano 2020



Fuente: Elaboración propia, 2022

Tabla 20. Categorización de UTFVI para verano 2020

<i>Rango UTFVI</i>	<i>Índice de varianza del campo térmico urbano (UTFVI)</i>	<i>Nivel de confort térmico urbano</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>%</i>
<i>Menor a 0</i>	Ninguno	Excelente	15,239.610	46.310
<i>0 a 0.005</i>	Débil	Bueno	7,042.230	21.400
<i>0.005 a 0.01</i>	Medio	Normal	4,936.590	15.001
<i>0.01 a 0.015</i>	Fuerte	Malo	3,046.050	9.256
<i>0.015 a 0.02</i>	Muy fuerte	Muy malo	1,587.870	4.825
<i>Mayor a 0.02</i>	Fortísimo	Pésimo	1,055.610	3.208
			Total	100.000

Fuente: Elaboración propia, 2023

UTFVI en otoño 2020

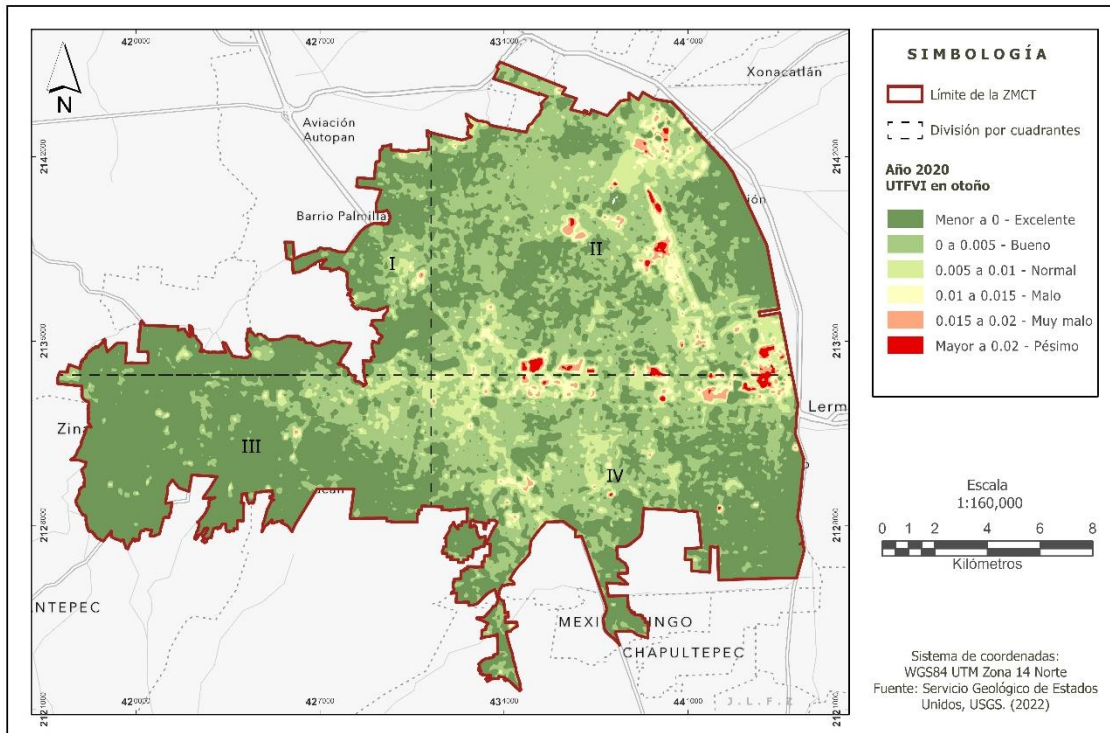
En el primer cuadrante del Figura 29, se identificó una mejoría en el confort térmico debido a que sólo una zona del este presentó valores de malo a pésimo confort térmico, y las demás zonas del noreste y sur en general tuvieron valores normales a excelentes. Para el segundo cuadrante se observa una notable disminución de confort térmico considerado malo en relación con las estaciones de primavera y verano, misma que se identifica sobre las mismas zonas industriales del sur y el Aeropuerto, aunque con menor extensión territorial. Las demás zonas del centro, oeste, este y norte mantuvieron valores en su mayor parte normales a excelentes del confort térmico.

En el tercer cuadrante ya no se presentó la zona que tuvo malos valores de confort térmico identificada en la estación de verano, además, la mayor parte de su superficie tuvo valores normales a excelentes, principalmente en dirección al centro y oeste. El cuarto cuadrante presentó resultados similares en relación con la estación anterior debido a que las zonas que presentaron mal confort térmico se encuentran contiguas al cuadrante II, pero disminuyeron en superficie. También las zonas ubicadas en el noroeste, oeste y centro tuvieron algunas áreas de bajo confort térmico, aunque con menor influencia. De esta forma la mayor parte de su superficie presentó mejores condiciones de confort térmico.

De forma general, en esta estación el cuadrante con mayor efecto de bajo confort térmico es el número II, seguido del número IV con pocas zonas, mientras que en los cuadrantes I y III se presentaron las mejores condiciones de confort térmico. Similarmente con la estación de primavera, las áreas donde comienza a disminuir el confort térmico siguieron el patrón del trazado urbano y vialidades principales.

La Tabla 21 muestra los resultados de las categorías por hectárea y sus porcentajes del UTFVI para otoño 2020, donde en relación con la estación de verano, la categoría de nivel excelente aumentó cerca del 4%, el nivel bueno aumentó casi un 14.5% y el nivel normal disminuyó 5%. Entre las categorías consideradas de mal confort térmico, en área la mala disminuyó 6%, la muy mala disminuyó cerca del 4% y la pésima también disminuyó cerca del 3% (valores comparados con la estación anterior).

Figura 29. Distribución espacial del confort térmico (UTFVI) en otoño 2020



Fuente: Elaboración propia, 2022

Tabla 21. Categorización de UTFVI para otoño 2020

<i>Rango UTFVI</i>	<i>Índice de varianza del campo térmico urbano (UTFVI)</i>	<i>Nivel de confort térmico urbano</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>%</i>
<i>Menor a 0</i>	Ninguno	Excelente	16,488.270	50.108
<i>0 a 0.005</i>	Débil	Bueno	11,781.180	35.803
<i>0.005 a 0.01</i>	Medio	Normal	3,203.190	9.734
<i>0.01 a 0.015</i>	Fuerte	Malo	979.470	2.977
<i>0.015 a 0.02</i>	Muy fuerte	Muy malo	320.400	0.974
<i>Mayor a 0.02</i>	Fortísimo	Pésimo	133.110	0.405
		Total		100.000

Fuente: Elaboración propia, 2023

Análisis comparativo del confort térmico (UTFVI) en las cuatro estaciones del 2020.

A continuación, en la tabla 22 se observa el análisis comparativo del Índice de Confort Climático en las cuatro estaciones del año 2020. Los niveles de confort excelentes (menores a 0) se presentaron desde un 43.608% en primavera, 44.150% en invierno, 46.310% en verano y la máxima en otoño con un 50.105%. El nivel de confort bueno (de 0 a 0.005) se presentó desde 20.934% en primavera, 21.400% en verano, 27.882% en invierno y la máxima en otoño con un 35.803% respecto a la superficie total. La categoría normal (de 0.005 a 0.01) se presentó desde un 9.734% en otoño, 15.001% en verano, 16.938% en invierno y la máxima con un 19.008% en primavera del área total.

La estación donde se presentó la categoría más alta de confort pésimo (mayor a 0.02) fue en verano con un 3.208% del área total, mientras que las estaciones donde se encontraron valores de confort muy malo (de 0.015 a 0.02) fueron primavera con un 4.159% y verano con un 4.825%. La siguiente categoría que se clasifica como confort malo (de 0.01 a 0.015) tuvo presencia desde 2.977% en otoño, 7.125% en invierno, 9.256% en verano hasta 10.801% con la máxima en primavera. En general, la estación donde se presentaron la mayor parte de las categorías superiores a 0.01 (malo a pésimo) fue verano con el 17.289%, mientras que las estaciones donde se presentaron categorías menores a 0.01 (normal a excelente) fue en otoño con el 95.645%.

Tabla 22. Análisis comparativo del confort térmico en las cuatro estaciones del 2020

<i>Rango IVCU</i>	<i>Categoría</i>	<i>Nivel de confort</i>	<i>Invierno (%)</i>	<i>Primavera (%)</i>	<i>Verano (%)</i>	<i>Otoño (%)</i>
<i>Menor a 0</i>	Ninguno	Excelente	44.150	43.608	46.310	50.108
	0 a 0.005	Débil	27.882	20.934	21.400	35.803
<i>0.005 a 0.01</i>	Medio	Normal	16.938	19.008	15.001	9.734
<i>0.01 a 0.015</i>	Fuerte	Malo	7.125	10.801	9.256	2.977
	0.015 a 0.02	Muy fuerte	Muy malo	4.159	4.825	0.974
<i>Mayor a 0.02</i>			2.866			
	Fortísimo	Pésimo	1.039	1.490	3.208	0.405
	Total	>0.01	11.030	16.450	17.289	4.356
	Total	<0.01	88.970	83.550	82.711	95.645

Fuente: Elaboración propia, 2023

3.2.3 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en la ZMCT durante el 2020.

Se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en la ZMCT para identificar y cuantificar los cambios en la vegetación de manera estacional, es importante recordar que el valor 1.0 contiene la vegetación más densa, en el 0.0 es muy baja y menor a 0 representa los rasgos de suelo desnudo y/o agua.

NDVI en invierno 2020

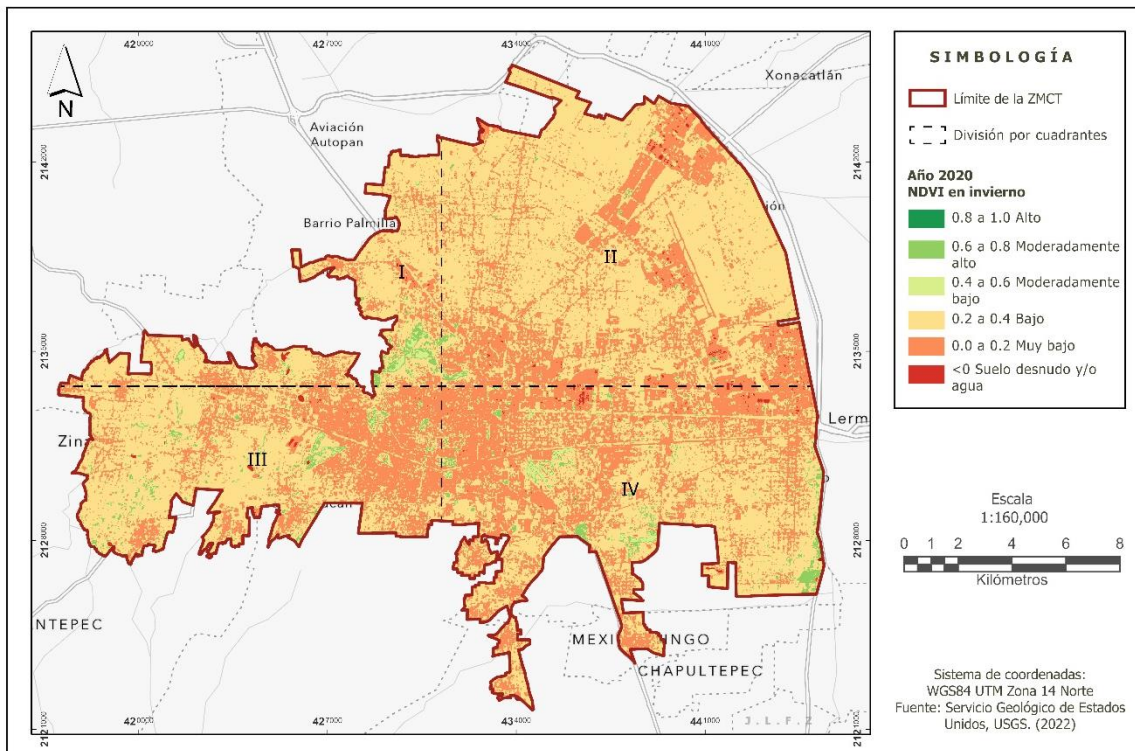
En el cuadrante I del Figura 30 se encontraron valores que comprenden desde muy baja presencia de vegetación hasta moderadamente alta, la mayor presencia de vegetación (valores 0.4 a 0.8) se concentra hacia el sureste debido a que en esta zona se encuentra el Cerro del Toloche donde se localizan bosques y pastizales. Hacia el noreste y el suroeste la mayor parte tiene baja o muy baja presencia de vegetación (valores 0.0 a 0.4).

El segundo cuadrante mostró el área con mayor vegetación que está contigua al cuadrante I en la misma zona del Cerro del Toloche (valores 0.4 a 0.8). En dirección al noreste y noroeste hay presencia de vegetación en áreas muy reducidas, igualmente hacia el centro, sur y sureste se observan algunas áreas dispersas de muy poca extensión de vegetación (0.4 a 0.8). De forma general, el sur, centro y noreste son las zonas de gran extensión donde la vegetación es muy baja (0.0 a 0.2).

En el cuadrante III, se identifican zonas con mayor extensión de presencia de vegetación moderadamente baja y alta en dirección al centro, oeste, noroeste y noreste. La zona con mayor extensión territorial pero menor densidad de vegetación se encuentra hacia el noreste, debido a que en esa zona se concentra una gran parte de espacios edificados y avenidas. En el cuadrante IV se observa que la mayor parte de la superficie tiene muy baja densidad de vegetación (0.0 a 0.2) y las áreas que presentan mayor densidad de vegetación se encuentran en dirección al este y centro del cuadrante.

La Tabla 23 muestra las categorías del NDVI por hectárea en la estación de invierno, donde la mayor parte de la superficie tiene la categoría de baja densidad de vegetación, con un 62%, seguida de la categoría muy baja con casi el 36%, solo la categoría moderadamente alta se acerca al 2.5% con 776.2 hectáreas.

Figura 30. Distribución espacial del Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en invierno 2020



Fuente: Elaboración propia, 2022

Tabla 23. Categorización de NDVI para invierno 2020

Rango NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	Área (ha)	%
<0	Suelo desnudo y/o agua	118.080	0.359
0.0 a 0.2	Muy bajo	11,378.520	34.578
0.2 a 0.4	Bajo	20,482.560	62.243
0.4 a 0.6	Moderadamente bajo	150.750	0.458
0.6 a 0.8	Moderadamente alto	776.250	2.359
0.8 a 1.0	Alto	0.990	0.003
			100.000

Fuente: Elaboración propia, 2023

NDVI en primavera 2020

En el cuadrante I del Figura 31 se observa mayor presencia de vegetación en las categorías moderadamente bajo y alto (0.4 a 0.8) al este, noreste y sureste, además del sur y suroeste, la categoría más baja se encontró principalmente al este y sur.

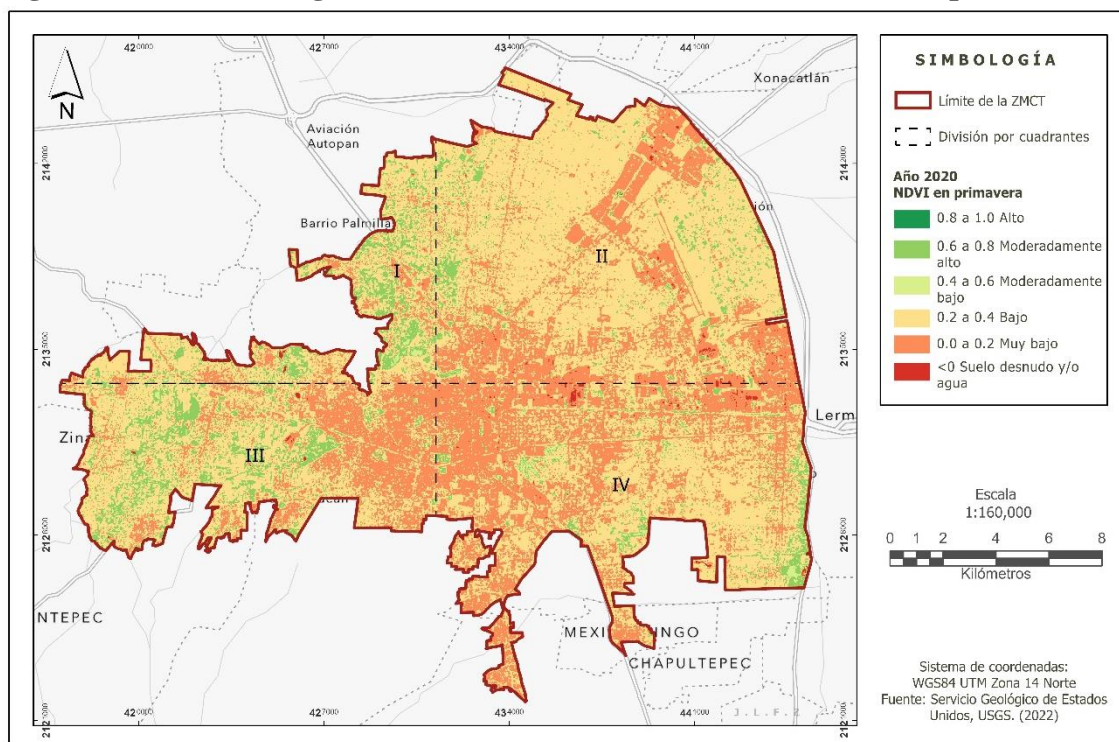
En el cuadrante II se identifican mayor número de zonas con presencia de vegetación al este, oeste y noroeste que están contiguas al cuadrante I. Para los valores más bajos, este cuadrante tiene un patrón de distribución similar al de invierno.

El tercer cuadrante tiene mayor cantidad de zonas con densidad de vegetación (0.4 a 0.8), cuya distribución se encuentra hacia el noroeste y centro principalmente, las zonas con menor densidad de vegetación, al igual que en invierno, son aquellas que se distribuyen hacia el noreste.

El cuadrante IV presenta resultados similares en la localización de las zonas con mayor densidad de vegetación respecto a la estación de invierno, pero aumenta en superficie, cuya ubicación se encuentra en dirección al este, centro y norte principalmente. Las zonas con muy baja densidad de vegetación son aquellas que están contiguas al cuadrante II y III, aunque también el suroeste del cuadrante IV hay pocas zonas que tienen mayor densidad de vegetación.

La Tabla 24 representa la categorización de los resultados de NDVI para la estación de primavera donde la categoría muy baja disminuyó cerca del 4%, la categoría baja disminuyó cerca del 3.5%. La categoría moderadamente baja se mantuvo similar a la estación anterior ya que la variación sólo fue un aumento de 0.069%. La categoría moderadamente alta tuvo un aumento de superficie alrededor del 7% respecto a la estación de invierno. La categoría alta se mantuvo similar a la estación anterior con un aumento del 0.002%.

Figura 31. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en primavera 2020



Fuente: Elaboración propia, 2022

Tabla 24. Categorización de NDVI para primavera 2020

Rango NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	Área (ha)	%
<math>< 0</math>	Suelo desnudo y/o agua	100.350	0.305
0.0 a 0.2	Muy bajo	10,114.290	30.736
0.2 a 0.4	Bajo	19,357.200	58.824
0.4 a 0.6	Moderadamente bajo	173.520	0.527
0.6 a 0.8	Moderadamente alto	3,159.900	9.603
0.8 a 1.0	Alto	1.530	0.005
			100.000

Fuente: Elaboración propia, 2023

NDVI en verano 2020

En el cuadrante I del Figura 32 se observa un notable aumento en la presencia de vegetación respecto a la estación anterior en la categoría moderadamente alto (0.6 a 0.8) al este, noreste sureste y suroeste, las categorías más bajas del sureste y este (0.0 a 0.4) disminuyeron.

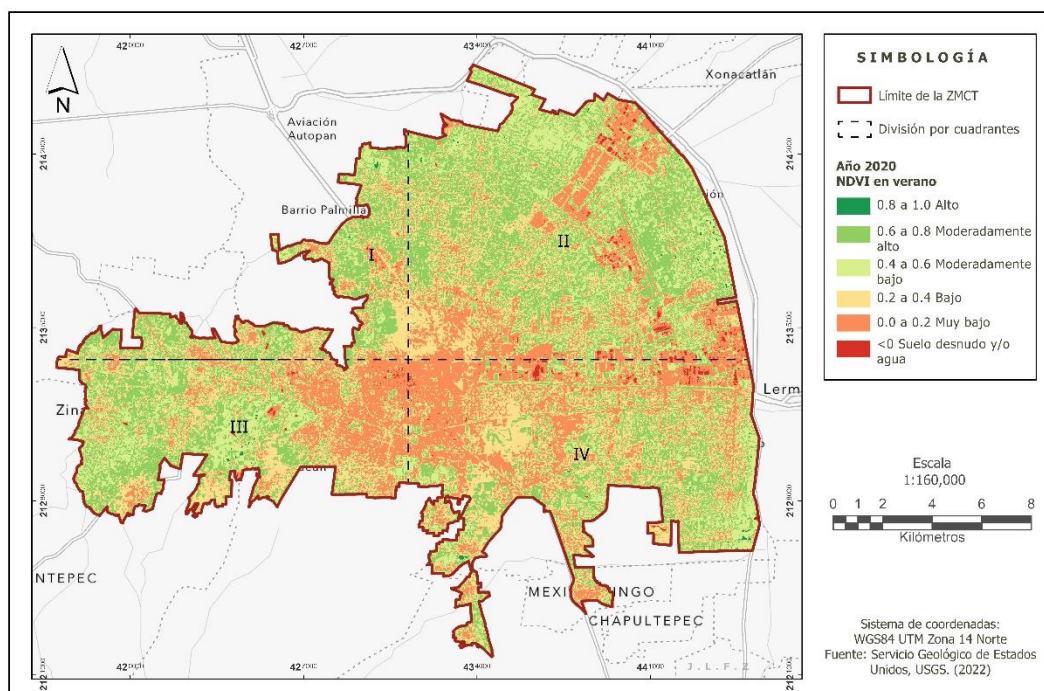
En el cuadrante II se identifica también el aumento en la presencia de vegetación respecto a la estación anterior en las categorías moderadamente abajo y moderadamente alto (0.4 a 0.8) con una distribución más extensa tanto en el centro, este, oeste, norte y noroeste principalmente, también en el sur hay un aumento, pero menos homogéneo. La categoría más alta se encontró con más frecuencia en el este (0.8 a 1.0). Las categorías de valores más bajos (0.0 a 0.4) se distribuyen hacia el suroeste, sur, sureste y noreste.

El cuadrante III muestra un aumento en la vegetación con una mayor distribución desde el centro hacia el oeste y noroeste en las categorías moderadamente bajo y alto (0.4 a 0.8), así como algunas zonas con la categoría más alta (0.8 a 1). Mientras que el este y noreste presentaron un patrón similar de distribución respecto a la estación anterior.

El cuadrante IV presentó un mayor crecimiento de vegetación desde el centro en dirección hacia el este, sur y suroeste en las categorías moderadamente bajo y alto (0.4 a 0.8), así como algunas zonas del norte donde se encuentran las zonas industriales. La categoría más alta (0.8 a 1) se ubicó principalmente en el sureste y suroeste. Las categorías más bajas se distribuyen contiguas a los cuadrantes III y II, igualmente en el centro en dirección al oeste.

La Tabla 25 representa la categorización de los resultados de NDVI para la estación de verano donde la categoría muy baja disminuyó cerca del 9%, la categoría baja disminuyó cerca del 29%. La categoría moderadamente baja aumentó 14%, la categoría moderadamente alta tuvo un aumento de superficie en un 23%. La categoría alta igualmente tuvo un aumento de 71 hectáreas (0.216%) respecto a la estación anterior.

Figura 32. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en verano 2020



Fuente: Elaboración propia, 2022

Tabla 25. Categorización de NDVI para verano 2020

Rango NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	Área (ha)	%
<math>< 0</math>	Suelo desnudo y/o agua	219.870	0.668
0.0 a 0.2	Muy bajo	7,308.900	22.212
0.2 a 0.4	Bajo	9,839.790	29.903
0.4 a 0.6	Moderadamente bajo	4,802.130	14.594
0.6 a 0.8	Moderadamente alto	10,662.480	32.403
0.8 a 1.0	Alto	72.720	0.221
			100.000

Fuente: Elaboración propia, 2023

NDVI en otoño 2020

En el cuadrante I del Figura 33 se observa un patrón de distribución similar en las categorías moderadamente bajo y alto (0.4 a 0.8) al este, noreste y sureste, además del sur y suroeste, aunque con una disminución de la categoría alta ya que no se identificó esta categoría. Las categorías más bajas se encontraron principalmente al sur y este.

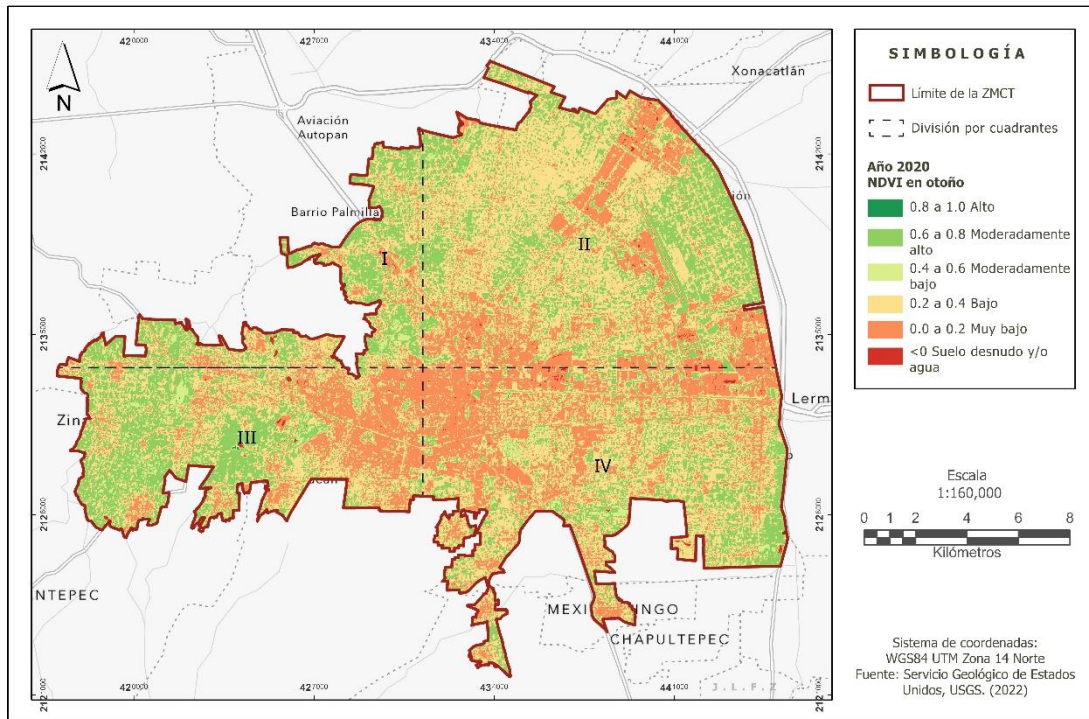
En el cuadrante II se identifica una notable disminución hacia el norte y centro en las categorías moderadamente bajo y alto (0.4 a 0.8) respecto a la estación anterior. El este mantiene un patrón similar en comparación con la estación anterior, aunque también se observa una disminución áreas que pasan de categoría moderadamente alto a moderadamente bajo (<0.6). Los valores más bajos (0.0 a 0.4) se mantienen hacia el suroeste, noreste, sur y sureste.

El cuadrante III conserva un patrón similar de distribución hacia el noroeste y centro respecto a la estación anterior, aunque con la misma tendencia a disminuir la densidad de vegetación (0.4 a 0.8). Las zonas con menor densidad de vegetación, al igual que en verano, son aquellas que se distribuyen hacia este y noroeste.

En el cuadrante IV se identifica una disminución en las áreas que se encuentran en dirección hacia el este, sur y suroeste, así como de las zonas industriales que se encuentran al norte. La categoría moderadamente baja (0.4 a 0.6) desaparece de una gran parte de las zonas, pero se mantiene la categoría moderadamente alta (0.6 a 0.8). Las categorías con menor densidad de vegetación (0.0 a 0.4) se mantienen similares al norte, noroeste y oeste contiguas a los cuadrantes II y III.

La Tabla 26 representa la categorización de los resultados de NDVI para la estación de otoño donde la categoría muy baja aumento cerca del 3%, la categoría baja aumentó cerca del 13% mientras que la categoría moderadamente baja disminuyó cerca del 13. La categoría moderadamente alta tuvo una disminución de superficie alrededor del 3% respecto a la estación de verano. La categoría alta disminuyó 66 hectáreas (0.202%)

Figura 33. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en otoño 2020



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla 26. Categorización de NDVI para otoño 2020

Rango NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	Área (ha)	%
<0	Suelo desnudo y/o agua	88.200	0.268
0.0 a 0.2	Muy bajo	8,336.520	25.334
0.2 a 0.4	Bajo	14,052.510	42.704
0.4 a 0.6	Moderadamente bajo	638.190	1.939
0.6 a 0.8	Moderadamente alto	9,785.250	29.736
0.8 a 1.0	Alto	6.210	0.019
			100.000

Fuente: Elaboración propia, 2023

Análisis comparativo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en las cuatro estaciones del año 2020.

A continuación, en la tabla 27 se observa el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en las cuatro estaciones del año 2020.

La estación donde se presentó mayor superficie de NDVI más alto (0.8 a 1.0) fue en verano con un 0.221%, seguida de otoño con un 0.019%, primavera e invierno con los porcentajes más bajos del área total (0.005% y 0.003%). La categoría moderadamente alta (0.6 a 0.8) igualmente fue la más alta en verano con un 32.403%, seguida de otoño con un 29.736%, primavera con un 9.603 e invierno el más bajo con un 2.539% de la superficie total. La categoría moderadamente baja (0.4 a 0.6) tuvo la mayor superficie en verano con un 14.594%, seguida de otoño con 1.939%, primavera con un 0.527% e invierno el más bajo con un 0.458%.

Categorías bajas (0.2 a 0.4) y muy bajas (0.0 a 0.2) se presentaron en la mayor parte de la superficie en las cuatro estaciones: bajas desde 29.903% en verano hasta 62.243%, la máxima en invierno; muy bajas desde 22.212% en verano hasta un 34.578% la máxima en invierno; Las superficies sin vegetación (menores a 0) se presentaron en otoño la mínima con 0.268% y la máxima en verano con 0.668%.

Tabla 27. Análisis comparativo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en las cuatro estaciones del año 2020

<i>Rango NDVI</i>	<i>Categorías</i>	<i>Invierno (%)</i>	<i>Primavera (%)</i>	<i>Verano (%)</i>	<i>Otoño (%)</i>
<0	Suelo desnudo y/o agua	0.359	0.305	0.668	0.268
0.0 a 0.2	Muy bajo	34.578	30.736	22.212	25.334
0.2 a 0.4	Bajo	62.243	58.824	29.903	42.704
0.4 a 0.6	Moderadamente bajo	0.458	0.527	14.594	1.939
0.6 a 0.8	Moderadamente alto	2.359	9.603	32.403	29.736
0.8 a 1.0	Alto	0.003	0.005	0.221	0.019

Fuente: Elaboración propia, 2023

3.3 Servicios Ecosistémicos de regulación climática: Captura de carbono, Reducción de ruido, Enfriamiento y Recreación en la ZMCT.

Se consideraron cuatro Servicios Ecosistémicos (SE) de regulación climática en las cuatro estaciones del año 2020 para comprender e identificar su distribución espacial. Posteriormente, con los mismos datos se estimó, normalizó y estandarizó cada indicador de suministro del SE relacionado con la AGEB que le corresponde para el posterior análisis cartográfico y cuantitativo de cada SE en cada estación.

3.3.1 Análisis espacial de los Servicios Ecosistémicos (SE) de regulación climática (captura de carbono, reducción de ruido, enfriamiento y recreación) en las cuatro estaciones del año 2020.

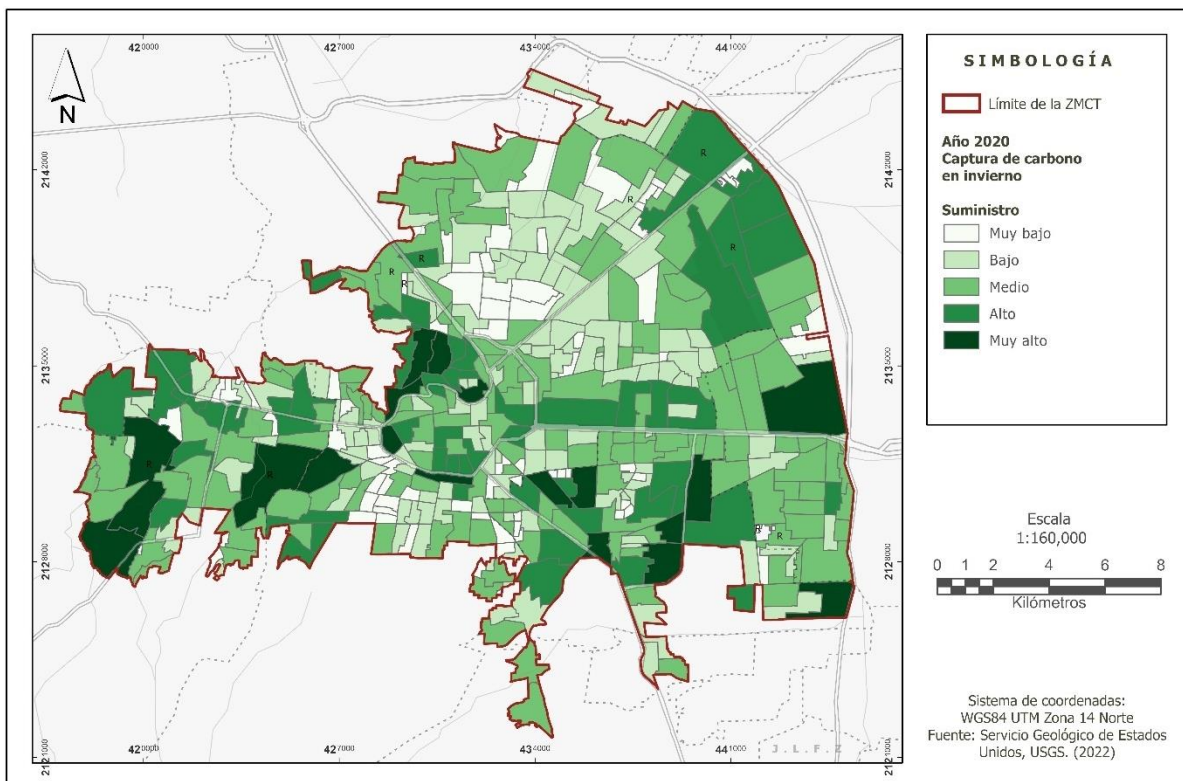
Servicio Ecosistémico: Captura de carbono

Dentro de la delimitación de la ZMCT se encuentran AGEBs tanto urbanas como rurales (por la cantidad de habitantes que debe ser mayor a 2,500 para ser considerada como AGEB urbana de acuerdo con INEGI). Debido a esto, se tomaron en cuenta AGEBs rurales ya que tienen presencia significativa de vegetación lo cual permite comparar los patrones geospaciales entre AGEBs urbanas y rurales vecinas. Se identifican con la letra R dentro de algunos polígonos.

Captura de carbono en invierno 2020

En el Figura 34 se identifican los diferentes suministros de captura de carbono en una escala cualitativa para la estación de invierno, donde el oeste, centro sureste y este de la ZMCT presentan muy altos valores de suministro. Mientras que en el norte se presenta una tendencia a disminuir y encontrarse en valores de medios a muy bajos.

Figura 34. Distribución espacial de la captura de carbono en invierno de 2020

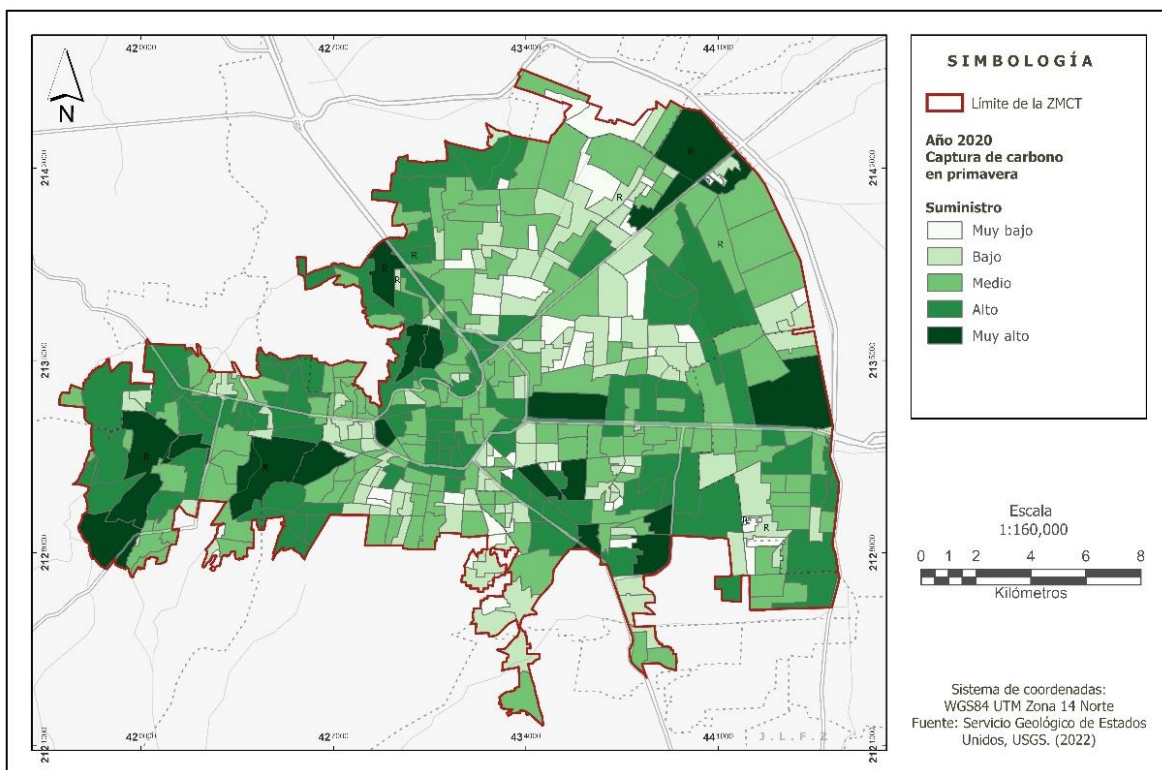


Fuente: Elaboración propia, 2023.

Captura de carbono en primavera 2020

La captura de carbono en primavera (Figura 35) muestra un aumento del suministro hacia el oeste, centro, sur, norte y noreste. Donde AGEBs rurales presentan valores muy altos de contribución debido a la alta presencia de árboles dispersos y agrupados. Los AGEBs urbanos con suministro muy bajo representan aquellas zonas donde puede no haber pasto, árboles dispersos y agrupados o bien, existen, pero con muy poca presencia. En términos generales, la captura de carbono aumentó respecto a la estación de invierno.

Figura 35. Distribución espacial de la captura de carbono en primavera de 2020

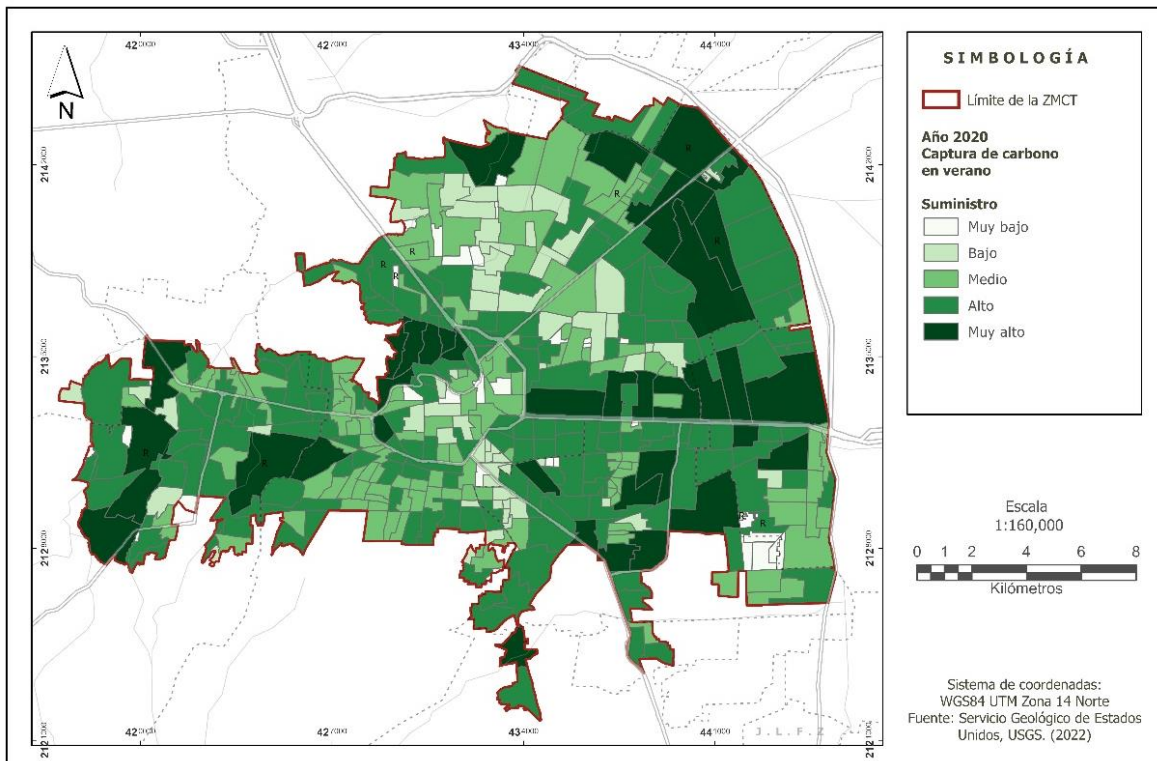


Fuente: Elaboración propia, 2023.

Captura de carbono en verano 2020

En verano (Figura 36) el suministro sobre la captura de carbono muestra valores medios a muy altos mayormente hacia el oeste, este, sureste y noreste, donde AGEBS rurales presentaron suministros significativos. Por el contrario, en el centro el suministro de captura de carbono disminuyó al identificarse AGEBS urbanas con valores medios a muy bajos en su mayoría.

Figura 36. Distribución espacial de la captura de carbono en verano de 2020

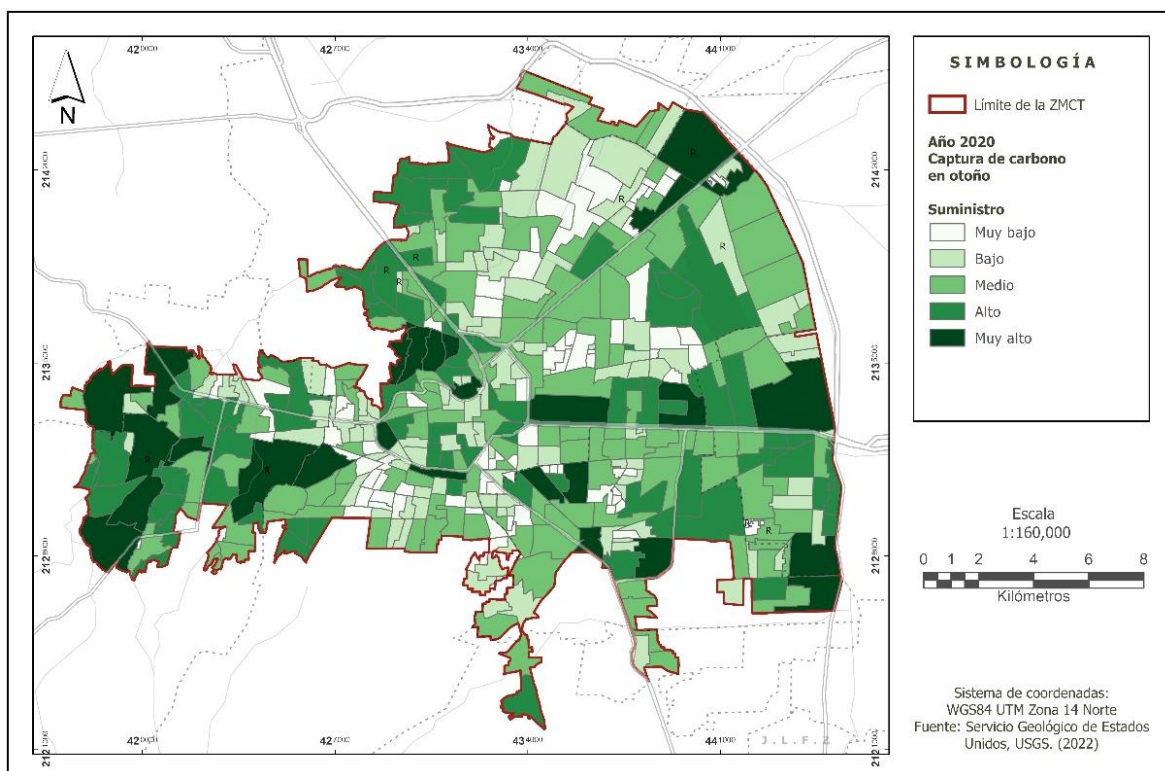


Fuente: Elaboración propia, 2023.

Captura de carbono en otoño 2020

La captura de carbono en otoño (Figura 37) presentó los suministros más altos en el oeste (en dirección a Zinacantepec), así como en el este (sobre Av. Paseo Tollocan hacia Lerma), centro (cerca de Santiago Tlaxomulco) y sur (parte de Metepec), aunque se encontró una tendencia a disminuir el suministro en AGEBs del norte, sur y parte del este. Esta disminución está relacionada al cambio en la vegetación por la pérdida de follaje plantas y árboles debido a fuertes vientos propios de la estación de otoño, además de disminución en la humedad de la vegetación a causa de lluvias menos frecuentes. En relación con las AGEBs rurales solo dos presentaron suministros muy altos (tres polígonos).

Figura 37. Distribución espacial de la captura de carbono en otoño de 2020



Fuente: Elaboración propia, 2023.

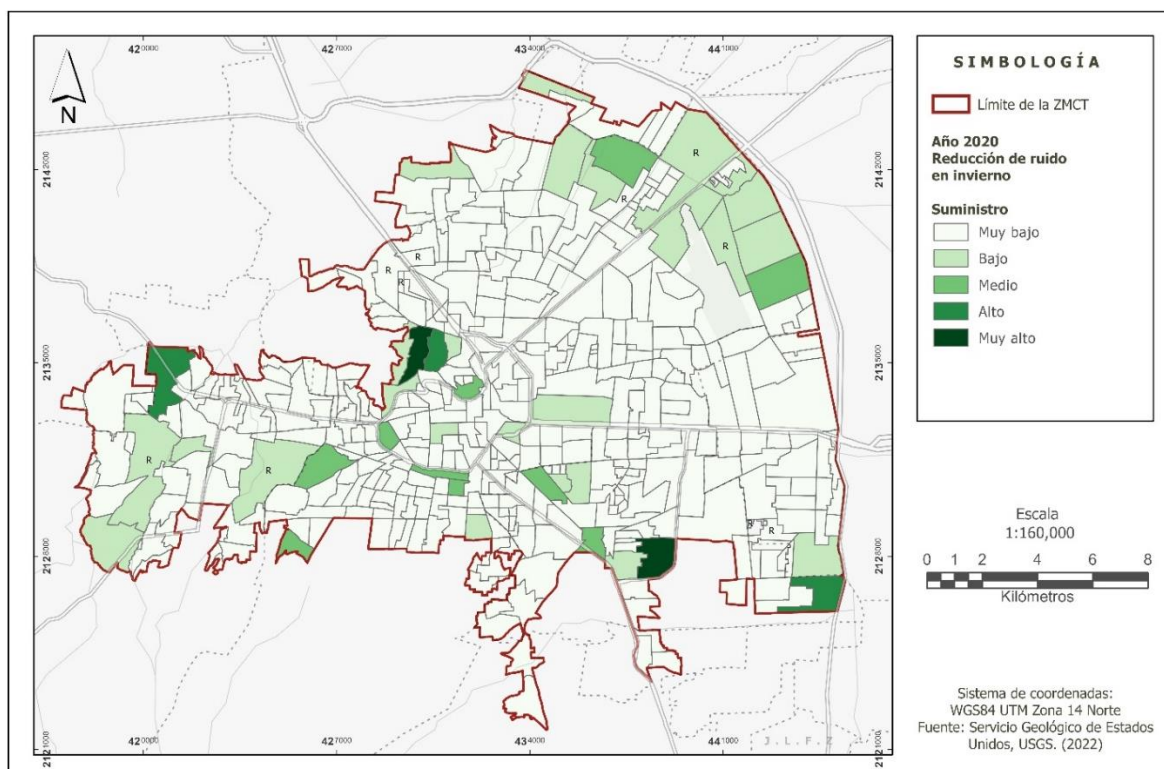
Servicio Ecosistémico: Reducción de ruido

Para la reducción de ruido sólo se consideraron metodológicamente las áreas de correspondientes a árboles agrupados y el pasto, ya que los árboles dispersos no cuentan con un índice que permita cuantificar la reducción de ruido de acuerdo con Derkzen et al. (2015).

Reducción de ruido en invierno 2020

En invierno (Figura 38) las zonas donde se presenta mayor suministro para la atenuación del ruido sólo se identifican en dos AGEB con los valores más altos sobre Santiago Tlaxomulco y de Metepec (sobre el Parque Ambiental Bicentenario). Los suministros bajos a altos se presentan en algunas AGEBs del oeste, centro, sur y noreste. Sin embargo, la mayor parte de la superficie de la ZMCT no proporciona atenuación al ruido en esta estación.

Figura 38. Distribución espacial de la reducción de ruido en invierno de 2020

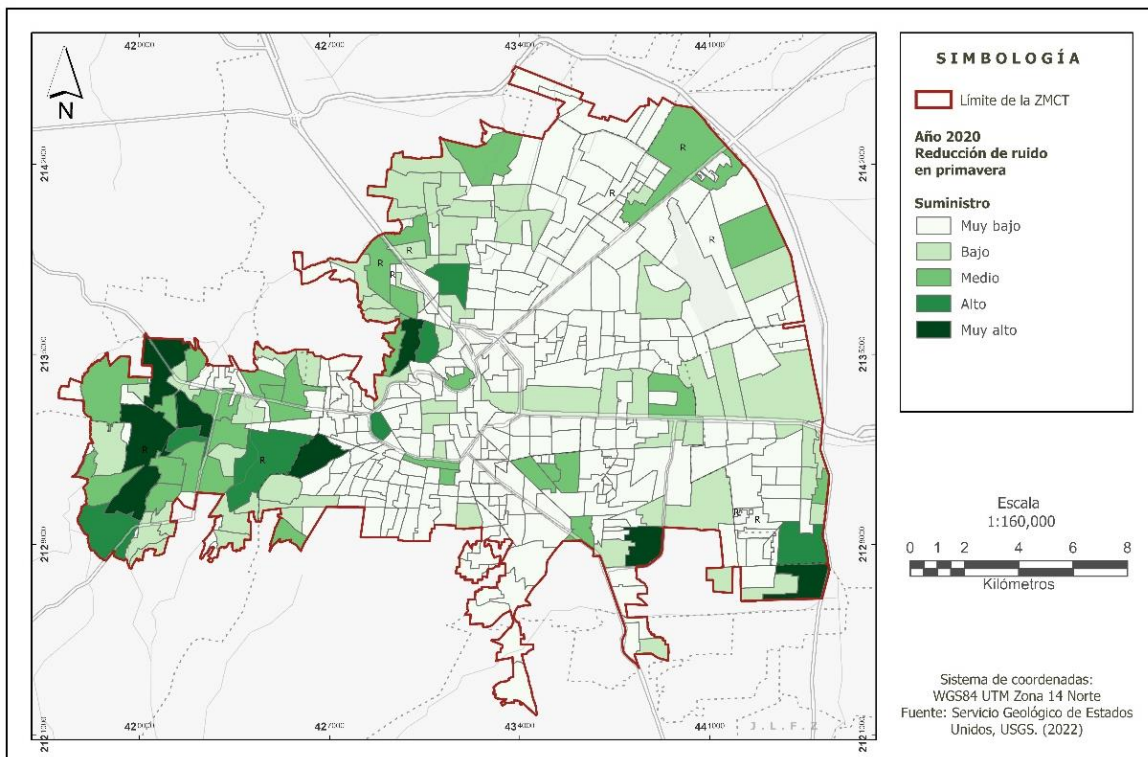


Fuente: Elaboración propia, 2023.

Reducción de ruido en primavera 2020

La comparación con la estación de invierno en la atenuación/reducción de ruido (como se observa en el Figura 39), permite identificar un aumento de este suministro para la estación de primavera en dirección al oeste (Zinacantepec) principalmente. También hacia el norte sobre San Pablo Autopan, Ixtlahuaca, Ejido Santiago Miltepec y Santiago Tlaxomulco. Hacia el este sobre Paseo Tollocan donde se encuentran ubicados parques industriales y fraccionamientos en su mayoría, además del noreste sobre San Blas Oztacatipan y la Constitución Toltepec que presentan un suministro medio. Al sur en Metepec algunos AGEB aumentaron de muy bajo a bajo y bajo a medio, mientras que sobre el Parque Ambiental Bicentenario el suministro en la atenuación del ruido se mantuvo muy alto. Finalmente, al sureste alrededor de Moderna San Sebastián también aumentó el suministro llegando a muy alto.

Figura 39. Distribución espacial de la reducción de ruido en primavera de 2020



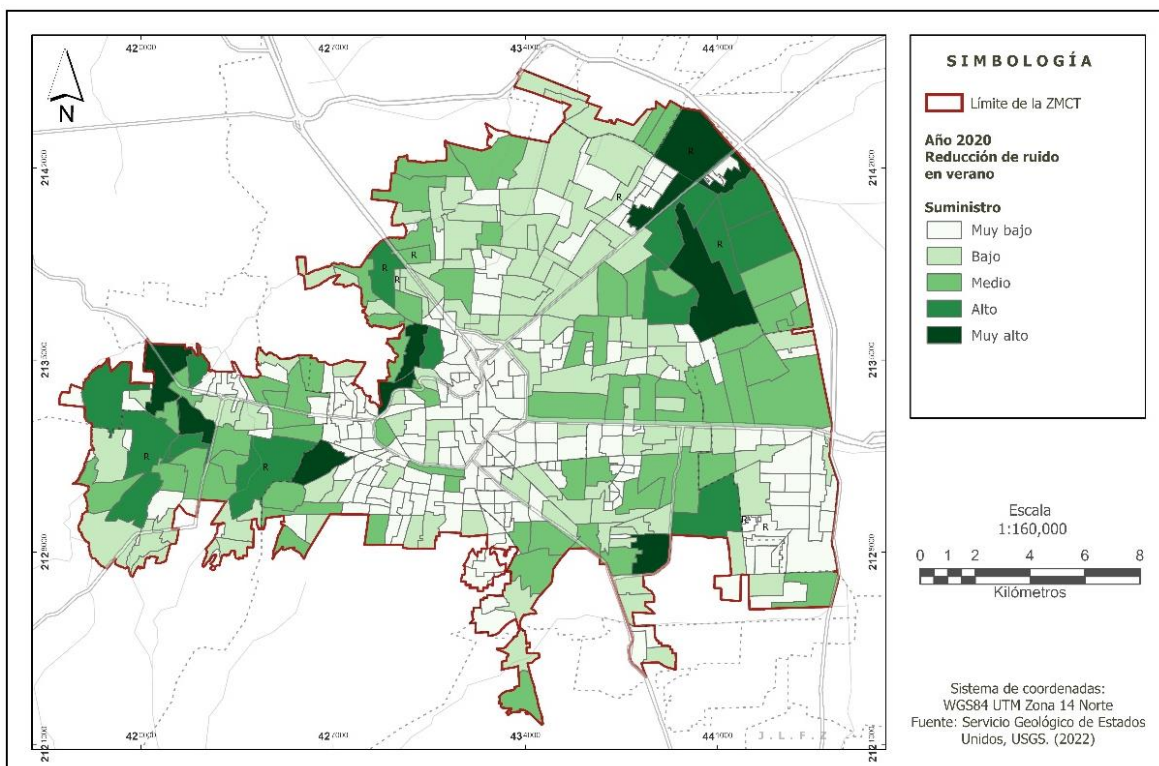
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Reducción de ruido en verano 2020

Al ser la estación donde las diversas especies vegetales, árboles, arbustos y presentan mayor desarrollo, volumen y crecimiento, se observa un aumento considerable en el Figura 40 en comparación con las estaciones anteriores. Si bien al oeste alrededor de Zinacantepec los suministros se mantuvieron similares y algunos disminuyeron, las AGEBs que mostraron mayor ganancia en suministro sobre la reducción de ruido se encuentran al este, sur, norte y noreste de la ZMCT.

Sin embargo, hacia el centro se presentó pérdidas de suministro en la reducción de ruido, igualmente, al sureste se identificó pérdidas alrededor de Moderna San Sebastián. Cabe resaltar que, al sur sobre Metepec, el Parque Ambiental Bicentenario se sigue manteniendo muy alto en suministro respecto de las estaciones anteriores y AGEBs de los alrededores aumentaron su reducción de ruido. De esta forma, verano se muestra como la estación más confortable en estas AGEBs donde la atenuación del ruido es mayor.

Figura 40. Distribución espacial de la reducción de ruido en verano de 2020



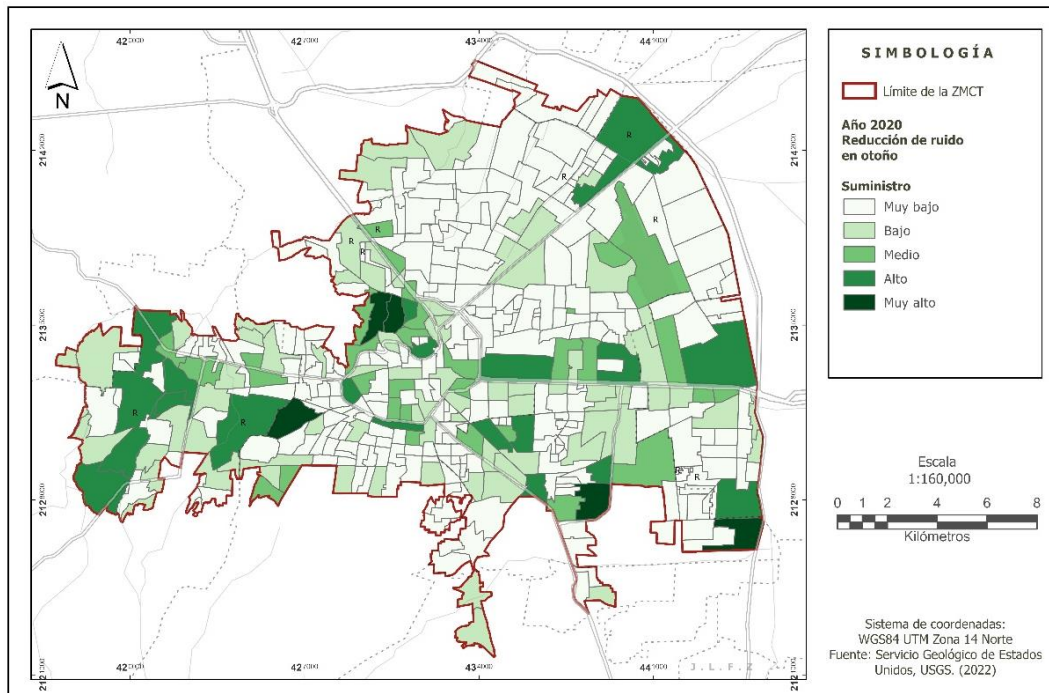
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Reducción de ruido en otoño 2020

Debido a la disminución en la vegetación en esta estación (Figura 41), se perdió suministro de reducción de ruido en AGEBs del norte adjuntas a las localidades de San Pablo Autopan, Jicaltepec Autopan, Jicaltepec Cuexcontitlán, San Andrés Cuexontitlán, San Cristóbal Huichochitlán, Santiago Miltepec, Calixtlahuaca y Santa Cruz Atzacapotzaltongo. Al noreste en las localidades Ejido de la Y Sección Siete A Revolución, San Diego de los Padres Cuexcontitlán, San Diego de los Padres Oztacatipan y San Mateo Oztacatipan.

Al este en San Lorenzo Tepaltitlán, Crespa Floresta, San Pedro Totoltepec, Santa Ana Tlapaltitlán, San Mateo Atenco, Lerma de Villada, Colonia los Cedros y El Cerrillo Vista Hermosa. Hacia el sureste Santa María Asunción, San Francisco Coaxusco, Metepec y San Lucas Tunco. En dirección al oeste sobre San Luis Mextepec, San Francisco Tlalcilcalpan, San Antonio Acahualco, Ejido San Lorenzo Cuauhtenco y San Miguel Zinacantepec. En el sur principalmente Calputitlán y AGEBs que colindan en el norte de esta localidad. Hacia el suroeste San Antonio Buenavista, San Cristóbal Tecolot, Santa Cruz Cuauhtenco, Tejalpa y Cacalomacan.

Figura 41. Distribución espacial de la reducción de ruido en otoño de 2020



Fuente: Elaboración propia, 2023.

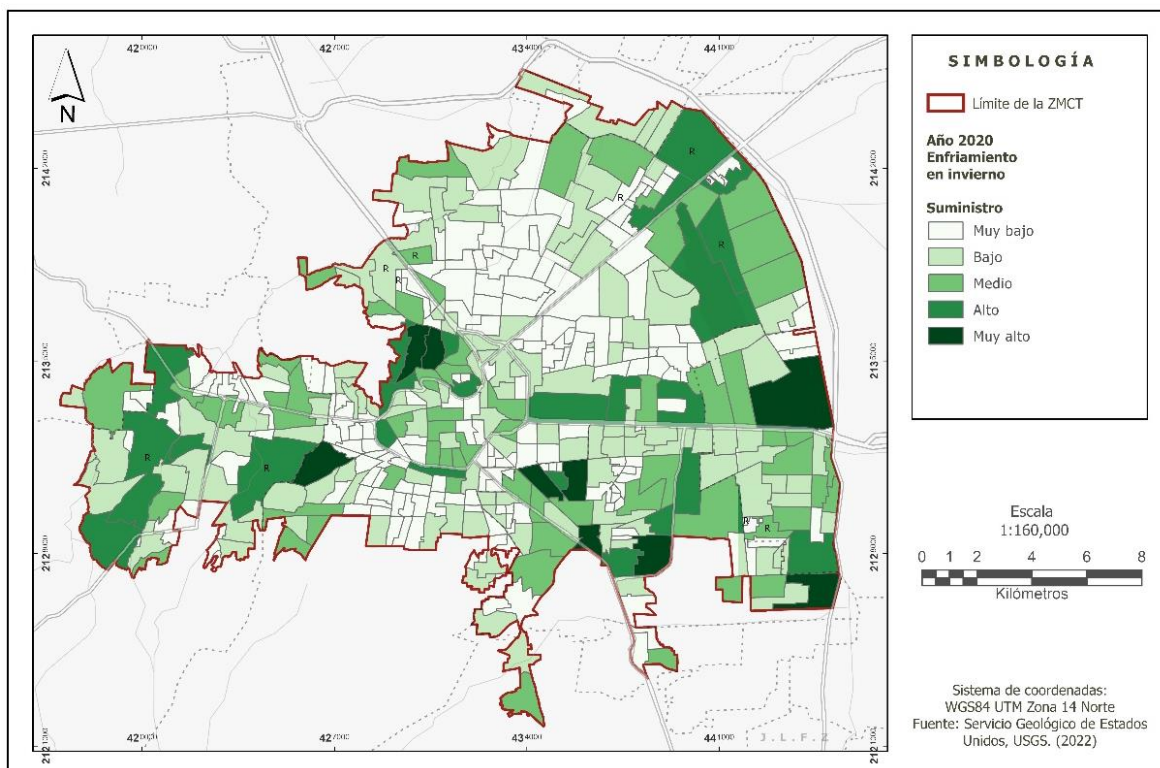
Servicio Ecosistémico: Enfriamiento

El enfriamiento se consideró de acuerdo con Derkzen et al. (2015) como la reducción cualitativa de temperatura por la vegetación a través de la sombra y la transpiración.

Enfriamiento en invierno 2020

En esta estación (Figura 42) el suministro más alto de enfriamiento se encontró en AGEBS al norte por Santiago Tlaxomulco, Santa Cruz Atzacapotzaltongo. En el noreste por Toluca 2000, San Blas Otzacatipan, San Blas Totoltepec, Villa Toscana, Francisco Villa, San Francisco Totoltepec, Guadalupe Totoltepec. Al este en Santa Ana Tlapaltitlán, Santa María Totoltepec, Lerma de Villada. En el sureste en las localidades San Francisco Coaxusco, Metepec, San Salvador Tizatlalli, San Lucas Tunco y San Lorenzo Coacalco. Al suroeste en San Buenaventura, Tejalpa, Ricardo Flores Magón y rurales. Hacia el oeste en San José Barbabosa, Los Rosales, La Joya, Cerro del Murciélago y Ejido San Lorenzo Cuauhtenco.

Figura 42. Distribución espacial del enfriamiento en invierno de 2020



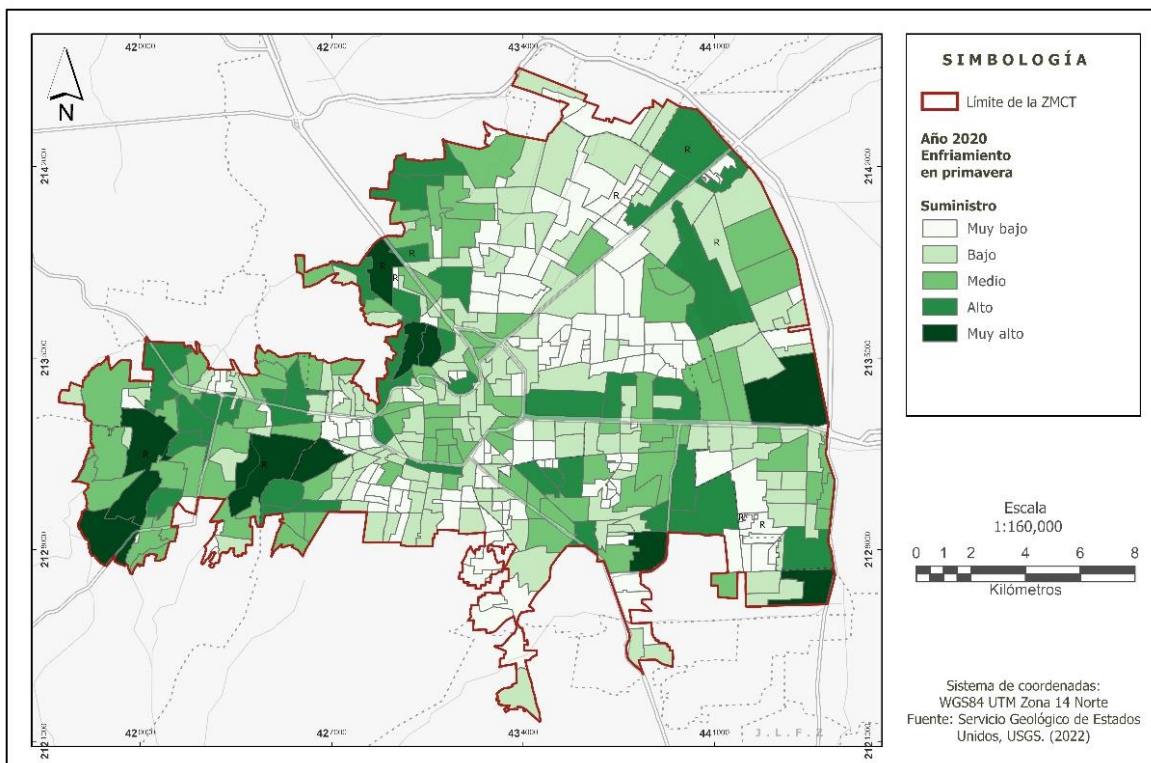
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Enfriamiento en primavera 2020

En esta estación (Figura 43), se identifica el aumento en el suministro de enfriamiento al norte en las localidades San Pablo Autopan, Palmillas, La Planada, Santiago Miltepec, Santiago Tlaxomulco, San Andrés Cuexcontitlán, Jicaltepec Autopan y Jicaltepec Cuexcontitlán. Al este por el Cerrillo Vista Hermosa, San Pedro Totoltepec, San Jerónimo Chichahualco y San Mateo Atenco. Hacia el sureste por San Salvador Tizatllali y San Lucas Tunco igualmente mostraron un aumento, pero en Santa María Magdalena Ocotitlán disminuyó.

En el centro de Toluca de Lerdo, también AGEBs aumentaron de suministro muy bajo a bajo y medio además del sur donde se ubica Capultitlán, aunque en San Felipe Tlalmimilolpan, San Bartolomé Tlatelulco y Santa María Nativitas disminuyó el suministro. Respecto al suroeste y oeste, las AGEBs que tuvieron los suministros bajos a medios de invierno, pasaron a ser altos en primavera y los medios a altos de invierno, pasaron a ser muy altos en primavera.

Figura 43. Distribución espacial del enfriamiento en primavera de 2020



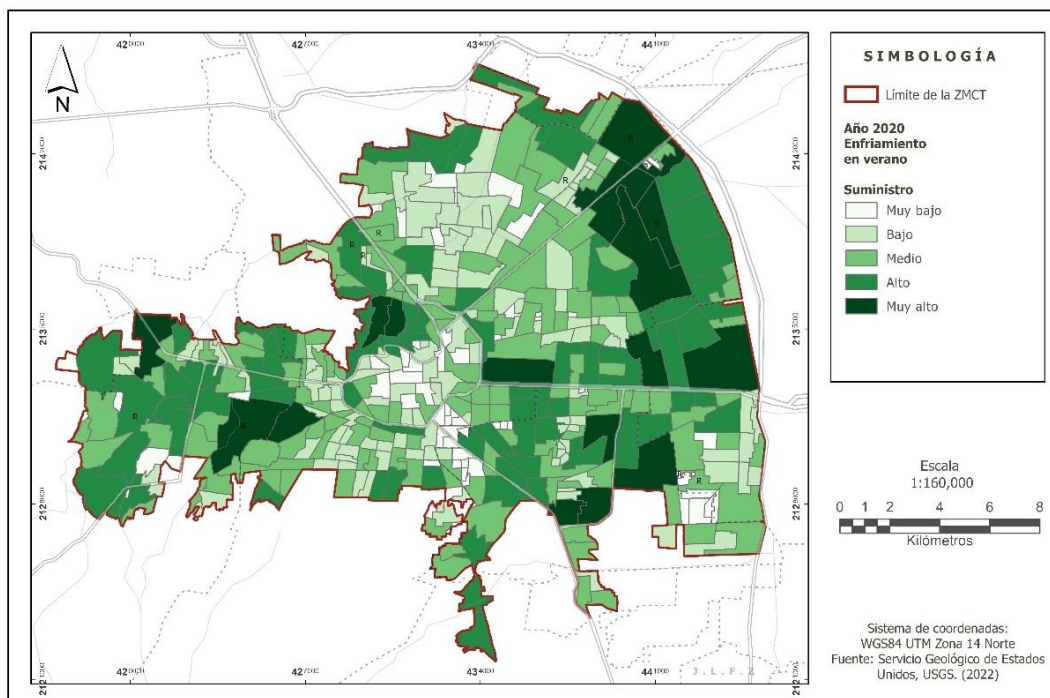
Fuente: Elaboración propia, 2023

Enfriamiento en verano 2020

En la estación de verano (Figura 44), al norte se observa un aumento en el suministro de enfriamiento sobre las localidades San Cristóbal Huichochitlán, Jicaltepec Autopan, San Marcos Yachihuacaltepec y Fraccionamiento San Diego aumentó el suministro. Al noroeste se aprecia un aumento en general sobre las localidades Ejido de la Y, San Diego de los P. Cuexcontitlán y Col. Guadalupe Victoria. Los más altos suministros en Toluca 2000 (parque industrial), San Blas Oztacatipan, Sauces, Francisco Villa, San Nicolás Tolentino, Villa Toscana, San Blas Totoltepec, Guadalupe Totoltepec y San Francisco Totoltepec.

Al este, los suministros más altos se encuentran en las localidades Lerma de Villada, Santa Ana Tlapaltitlán, San Mateo Atenco y Santa María Totoltepec. Hacia el sureste las localidades que mostraron aumento en el suministro fueron San Salvador Tizatlalli, San Jorge Pueblo Nuevo y Santa María Magdalena Ocotitlán. Al sur, aumentó el suministro en Capultitlán, San Felipe Tlalmimilolpan, San Bartolomé Tlatelulco, El Arenal, Santa María Nativitas y San Lorenzo Cuauhtenco. Hacia el suroeste el suministro se mantuvo similar en relación con la estación de primavera en las localidades de San Buenaventura y Cacalomacán.

Figura 44. Distribución espacial del enfriamiento en verano de 2020



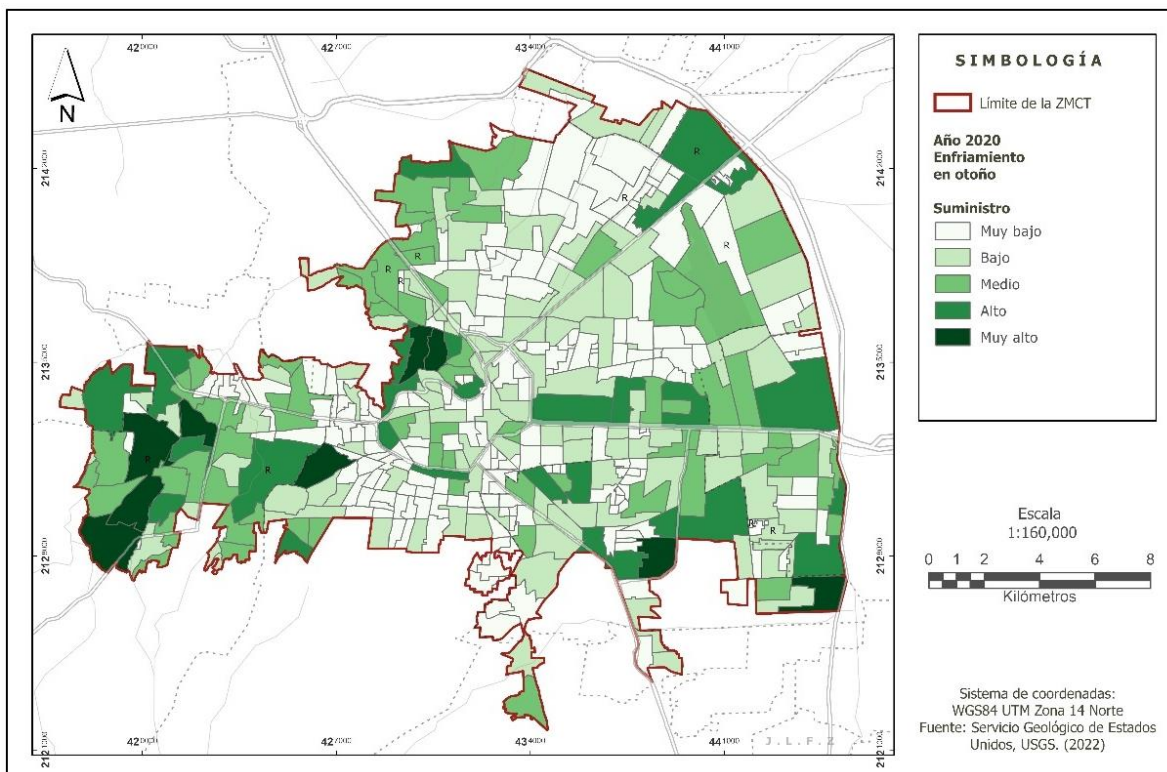
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Enfriamiento en otoño 2020

En el Figura 45, en general se observa una notable disminución del suministro de enfriamiento para la estación de otoño, donde quedan como suministros más altos al norte: Jicaltepec Autopan, Santiago Tlaxomulco y Santa Cruz Atzacapoltzaltongo. Al noreste, en Toluca 2000 (Parque Industrial), San Blas Otzacatipan, Francisco Villa, San Blas Totoltepec y Villa Toscana. Hacia el este: Lerma de Villada, Santa María Totoltepec y Santa Anta Tlapaltitlán.

En dirección al sureste: San Lucas Tunco, San Salvador Tizatlalli, San Lorenzo Coacalco, Metepec y San Francisco Coaxusco. En el centro cuatro AGEBS mantuvieron los valores más altos de suministro, igualmente, al suroeste San Buenaventura, Tejalpa y Colonia Ricardo Flores Magón. Al oeste: San Miguel Zinacantepec, La Joya y Cerro del Murciélago.

Figura 45. Distribución espacial del enfriamiento en otoño de 2020



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Servicio Ecosistémico: Recreación

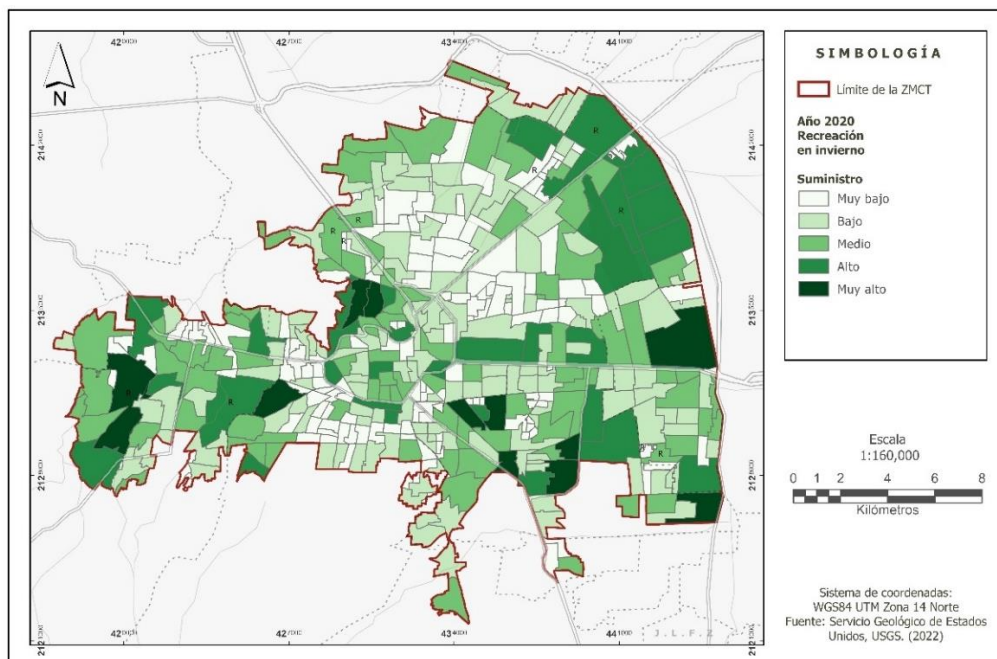
La recreación está considerada como el potencial de los EVU para la recreación diaria por las actividades al aire libre y que son de corta duración, las cuales pueden ser: caminar, ejercicio físico y relajación.

Recreación en invierno 2020

En esta estación (Figura 46), las localidades con mayor suministro de recreación al norte fueron Santiago Tlaxomulco y Santa Cruz Atzacapotzaltongo. Al noreste, en Toluca 2000 (Parque Industrial), San Diego de los P. Cuexcontitlán, San Blas Oztacatipan, Francisco Villa, San Blas Totoltepec, Villa Toscana, Guadalupe Totoltepec, La Constitución Toltepec, San Francisco Totoltepec y Arroyo Vista Hermosa presentaron mayor suministro de recreación. Al este Lerma de Villada, Santa María Totoltepec y Santa Ana Tlapaltitlán. Hacia el sureste: San Francisco Coaxusco, Metepec, San Lorenzo Coacalco y San Lucas Tunco.

Al suroeste: San Buenaventura y Colonia Ricardo Flores Magón también con suministro muy alto. En el oeste: La Joya, Cerro del Murciélago, seguido del Ejido San Lorenzo Cuauhtenco, San José Barbabosa y Los Rosales.

Figura 46. Distribución espacial de la recreación en invierno de 2020



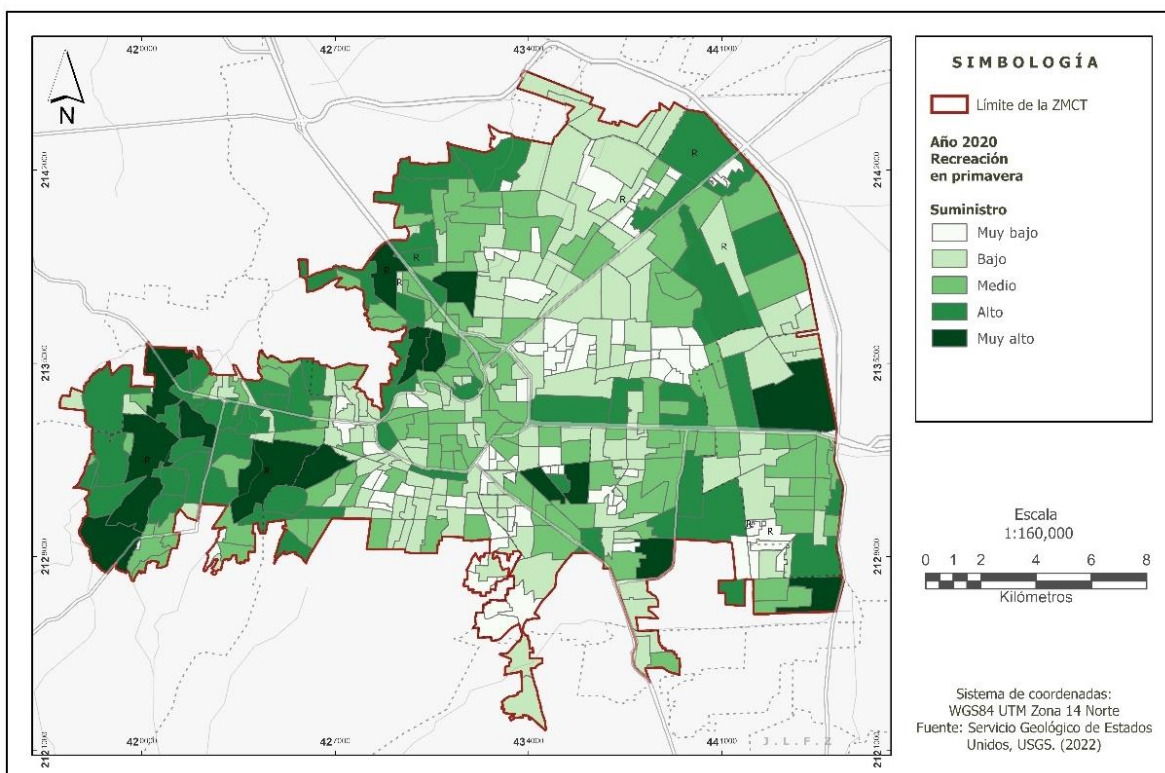
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Recreación en primavera 2020

En la estación de primavera (Figura 47), al norte: las localidades Palmillas, La Planada, Ejido Santa Cruz Atzacapozaltongo, Santiago Miltepec, Santiago Tlaxomulco y Santa Cruz Atzacapoztaltongo mostraron suministros muy altos de recreación. Al noreste: Toluca 2000 (Parque Industrial), San Blas Otzacatipan, San Blas Totoltepec, Francisco Villa, San Francisco Totoltepec y La Constitución Toltepec tuvieron suministros altos.

Hacia el este, las localidades Santa Ana Tlapaltitlán, Santa María Totoltepec y Lerma de Villada tuvieron suministros similares de recreación respecto de la estación anterior. En el sureste, San Francisco Coaxusco, Metepec, San Lorenzo Coacalco, San Salvador Tizatlalli, Residencial Foresta y San Lucas Tunco mostraron suministros altos a muy altos. Hacia el suroeste, los suministros más altos se encontraron en San Buenaventura, Tejalpa y Colonia Ricardo Flores Magón. Al oeste también los más altos en: La Joya, Cerro del Murciélago, San José Barbabosa, Los Rosales y Ejido San Lorenzo Cuauhtenco.

Figura 47. Distribución espacial de la recreación en primavera de 2020



Fuente: Elaboración propia, 2023.

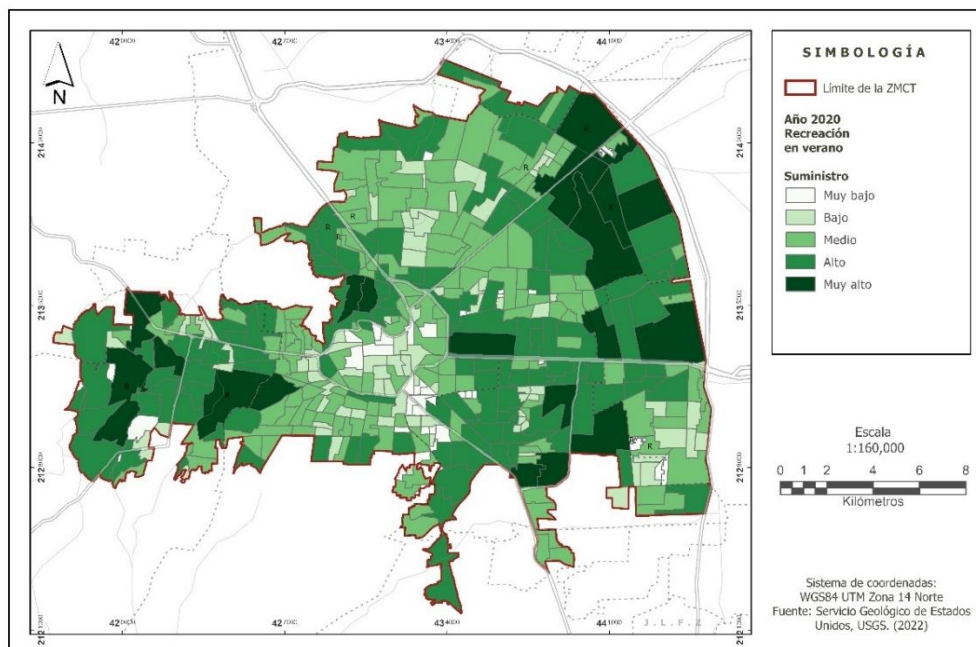
Recreación en verano 2020

En la estación de verano (Figura 48), los suministros más altos sólo se presentaron en las localidades de Santiago Tlaxomulco y Santa Cruz Atzacapotzaltongo. Al noreste: Toluca 2000 (Parque Industrial), San Blas Otzacatipan, San Blas Totoltepec, Francisco Villa, Villa Toscana presentaron suministros muy altos. Al este: Santa Ana Tlapaltitlán, parte de San Mateo Atenco y Lerma de Villada tuvieron suministros muy altos.

En el sureste: San Salvador Tizatlalli y San Lorenzo Coacalco, mientras que, en Metepec, San Francisco Coaxusco, San Jorge Pueblo Nuevo y Santa María Magdalena Ocotitlán el suministro fue alto. La localidad al centro (Toluca de Lerdo) aumentó el suministro a categoría alta en varias AGEBs así como en el sur donde se ubica Capultitlán, San Bartolomé Tlatelulco, Santa María Nativitas y San Lorenzo Cuauhtenco.

En el suroeste, sólo las localidades San Buenaventura y Colonia Ricardo Flores Magón mostraron suministros muy altos. Al oeste: La Joya, Cerro del Murciélago y Ejido San Lorenzo Cuauhtenco, San José Barbabosa y Los Rosales mostraron suministros muy altos de recreación.

Figura 48. Distribución espacial de la recreación en verano de 2020



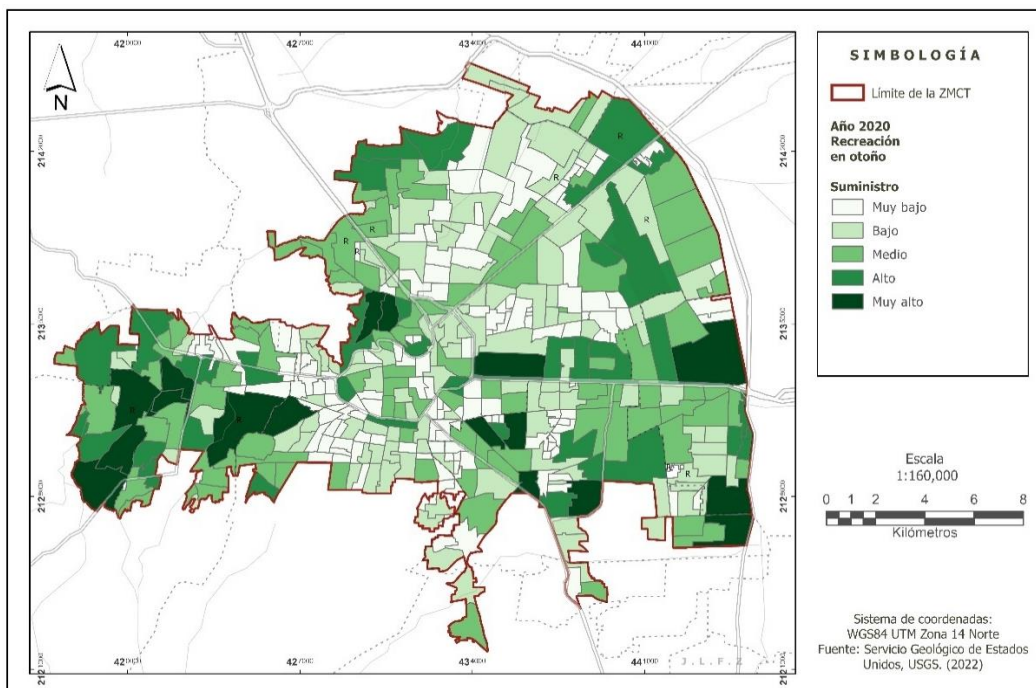
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Recreación en otoño 2020

En esta estación (Figura 49) también se observa una tendencia a disminuir el suministro de recreación respecto la estación anterior. Hacia el norte las localidades: Santiago Tlaxomulco, Santa Cruz Atzacapotzaltongo, parte de San Pablo Autopan y Jicaltepec Autopan presentaron suministros altos a muy altos. Hacia el noreste, Toluca 2000 (Parque Industrial), San Blas Oztacatipan, Francisco Villa, Villa Toscana, San Blas Totoltepec, San Francisco Totoltepec y parte de San Miguel Totoltepec mostraron suministro de categoría alta únicamente. Al este: Santa Ana Tlapaltitlán y Lerma de Villada tuvieron suministros muy altos de recreación. En el sureste, San Francisco Coaxusco, San Lucas Tunco y una parte de Metepec aumentan su categoría a muy alta, mientras que San Lorenzo Coacalco disminuye en un AGEB a categoría alta.

En el suroeste: San Buenaventura, Tejalpa y Colonia Ricardo Flores Magón presentaron suministros muy altos de recreación. Al oeste, La Joya, Cerro del Murciélago, San José Barbabosa, Los Rosales y parte de San Miguel Zinacantepec tuvieron suministros muy altos. Sin embargo, algunas localidades aledañas disminuyeron el suministro de recreación.

Figura 50. Distribución espacial de la recreación en otoño de 2020



Fuente: Elaboración propia, 2023.

3.3.2 Análisis cuantitativo de los Servicios Ecosistémicos (SE) de regulación climática (captura de carbono, reducción de ruido, enfriamiento y recreación) en las cuatro estaciones del 2020.

Servicios Ecosistémicos (SE) de regulación climática en invierno

En invierno (Tabla 28) la contribución relativa de árboles agrupados (los cuales forman un dosel arbóreo) en relación con la captura de carbono fue del 11.8%, mientras que los árboles dispersos contribuyeron en un 88% y el pasto no tuvo una contribución significativa. Los árboles agrupados tuvieron mayor contribución en la reducción de ruido con el 72% y el pasto la menor con el 28% (los árboles dispersos no están considerados en la metodología). La mayor contribución sobre el enfriamiento fue del 87.4% por árboles dispersos, los árboles agrupados contribuyeron con 8% y el pasto con 4.6%. Para la recreación los árboles dispersos contribuyeron con el 9.9%, los árboles dispersos 80% y el pasto con 10.1%. En concreto, los árboles dispersos tuvieron una mayor contribución relativa en la captura de carbono, enfriamiento y recreación durante el invierno.

Tabla 28. Contribución relativa de cada tipo EVU a SE en invierno

Tipo EVU	Área (ha)	%	Carbono capturado (ton) en el EVU	%	Reducción de ruido (dB atenuados) en el EVU	%	Enfriamiento Reducción de temperatura por la vegetación en el EVU	%	Recreación Índice de recreación/ha	%
Árboles agrupados	122.9	7.6	19,203.2	11.8	13,830.8	72.0	122.9	8.0	356.5	9.9
Árboles dispersos	1,344.9	83.5	143,094.2	88.0	-----	-----	1,344.9	87.4	2,891.5	80.0
Pasto	143.1	8.9	243.3	0.1	5,366.3	28.0	71.6	4.6	364.9	10.1

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Servicios Ecosistémicos (SE) de regulación climática en primavera

En primavera (Tabla 29) la contribución relativa de árboles agrupados sobre la captura de carbono se mantuvo similar a la estación de invierno con el 11.6%, igualmente los árboles dispersos con el 87.7% y el pasto aumentó a 0.7%. En relación con la contribución de los árboles agrupados sobre la reducción de ruido disminuyó a 34.9% y el pasto aumentó a 65.1%. La contribución de árboles agrupados para el enfriamiento disminuyó a 6.7%, los árboles dispersos igualmente disminuyeron su contribución con un 74.5% y el pasto aumentó a 18.8%. Para la recreación, la contribución de árboles agrupados disminuyó a 7.1%, la contribución de árboles dispersos aumentó a 58% y la contribución del pasto aumentó a 34.8%. En general, los árboles dispersos mostraron mayor contribución relativa en la captura de carbono, enfriamiento y recreación durante la primavera.

Tabla 29. Contribución relativa de cada tipo EVU a SE en primavera

Tipo EVU	Área (ha)	%	Carbono capturado (ton) en el EVU	%	Reducción de ruido (dB atenuados) en el EVU	%	Enfriamiento Reducción de temperatura por la vegetación en el EVU	%	Recreación Índice de recreación/h a	%
Árboles agrupados	186.7	5.7	29,156.3	11.6	2,099.9	34.9	186.7	6.7	541.3	7.1
Árboles dispersos	2,068.8	62.7	220,123.5	87.7	-----	-----	2,068.8	74.5	4,448.0	58.1
Pasto	1045.1	31.7	1,776.6	0.7	3,919.1	65.1	522.5	18.8	2,665.0	34.8

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Servicios Ecosistémicos (SE) de regulación climática en verano

En verano (Tabla 30) la contribución relativa de árboles agrupados sobre la captura de carbono respecto a la estación de primavera disminuyó a 6.5%, mientras que la contribución de árboles dispersos aumentó a 92.8%, la contribución del pasto se mantuvo igual con 0.7%. La contribución a la reducción de ruido por el pasto aumentó a 76.3% y la contribución de árboles agrupados fue del 23.7%. El enfriamiento disminuyó a 3.7% por árboles agrupados, mientras que la contribución de árboles dispersos aumentó a 78.3%, el pasto se mantuvo similar con 18.0%. La contribución a la recreación disminuyó a 4% por árboles agrupados, a 62.1% por árboles dispersos y a 33.9% por pasto. En resumen, en verano la contribución relativa de árboles dispersos al igual que en las estaciones anteriores, fue mayor en la captura de carbono, enfriamiento y recreación.

Tabla 30. Contribución relativa de cada tipo EVU a SE en verano

Tipo EVU	Área (ha)	%	Carbono capturado (ton) en el EVU	%	Reducción de ruido (dB atenuados) en el EVU	%	Enfriamiento Reducción de temperatura por la vegetación en el EVU	%	Recreación Índice de recreación/ha	%
Árboles agrupados	205.0	3.2	32,024.1	6.5	23,064.8	23.7	205.0	3.7	594.6	4.0
Árboles dispersos	4,295.9	66.3	457,081.6	92.8	-----	-----	4,295.9	78.3	9,236.1	62.1
Pasto	1,977.9	30.5	3,362.4	0.7	74,170.5	76.3	988.9	18.0	5,043.6	33.9

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Servicios Ecosistémicos (SE) de regulación climática en otoño

En otoño (Tabla 31) la contribución relativa de árboles agrupados sobre la captura de carbono aumentó a 57.3%, mientras que la contribución de árboles dispersos disminuyó a 42.6%, la contribución del pasto disminuyó a 0.2%. Sobre la reducción de ruido la contribución de árboles agrupados aumentó a 91.3% y la contribución del pasto disminuyó a 8.7%. La contribución de árboles agrupados sobre el enfriamiento aumentó a 44.8%, la de árboles dispersos disminuyó a 48.8% y la contribución del pasto disminuyó a 6.4% respecto a la estación anterior.

En relación con la recreación los árboles agrupados aumentaron su contribución a 48.5%, mientras que los árboles dispersos disminuyeron su contribución a 39.3% y la contribución del pasto disminuyó a 12.2%. En general, la contribución relativa de los árboles agrupados fue mayor en otoño -a diferencia de las estaciones anteriores- para la captura de carbono, reducción de ruido y recreación.

Tabla 31. Contribución relativa de cada tipo EVU a SE en otoño

Tipo EVU	Área (ha)	%	Carbono capturado (ton) en el EVU	%	Reducción de ruido (dB atenuados) en el EVU	%	Enfriamiento Reducción de temperatura por la vegetación en el EVU	%	Recreación Índice de recreación/ha	%
Árboles agrupados	809.46	42.1	126,437.7	57.3	91,064.3	91.3	809.5	44.8	2,347.4	48.5
Árboles dispersos	883.3	45.9	93,983.1	42.6	-----	-----	883.3	48.8	1,899.1	39.3
Pasto	231.39	12.0	393.4	0.2	8,677.1	8.7	115.7	6.4	590.0	12.2

Fuente: Elaboración propia, 2023.

3.3.3 Análisis comparativo de los Servicios Ecosistémicos (SE) de regulación climática (captura de carbono, reducción de ruido, enfriamiento y recreación) en las cuatro estaciones del año 2020.

Análisis comparativo del Servicio Ecosistémico (SE) de regulación climática: captura de carbono, en las cuatro estaciones del año 2020.

En la Tabla 32 se observa la contribución relativa de captura de carbono en las cuatro estaciones del 2020 y se establecen comparativos por estación, no entre EVUs. La mayor contribución de captura de carbono en las cuatro estaciones la realizan los árboles dispersos: con el 42.6% (93,983.1 ton) del carbono capturado en otoño hasta el 92.8% (457,081.6 ton) del carbono capturado en verano; por la importancia de su contribución le siguen los árboles agrupados con 6.5% (29,156.3 y 32,024.1 ton) del carbono capturado en primavera y verano, hasta 57.3% (126, 437.7 ton) del carbono capturado en otoño. Las áreas cubiertas de pasto realizaron la menor contribución a la captura de carbono con 0.1% (243.3 ton) en invierno hasta 0.7% (1,776.6 y 3,362.4 ton) en primavera y verano.

Tabla 32. Contribución relativa de captura de carbono en las cuatro estaciones del año 2020

Tipo Espacio Verde Urbano (EVU)	Invierno		Primavera		Verano		Otoño	
	Captura de carbono (ton)	%	Captura de carbono (ton)	%	Captura de carbono (ton)	%	Captura de carbono (ton)	%
Árboles agrupados	19,203.2	11.8	29,156.3	6.5	32,024.1	6.5	126,437.7	57.3
Árboles dispersos	143,094.2	88.0	220,123.5	87.7	457,081.6	92.8	93,983.1	42.6
Pasto	243.3	0.1	1,776.6	0.7	3,362.4	0.7	393.4	0.2

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Análisis comparativo del Servicio Ecosistémico (SE) de regulación climática: reducción de ruido, en las cuatro estaciones del año 2020.

En la Tabla 33 se muestra la contribución relativa de reducción de ruido en las cuatro estaciones del año 2020. La mayor contribución sobre la reducción de ruido en el año 2020 fue por árboles agrupados de acuerdo con el indicador: se identificó desde el 23.7% (23,064.8 dB A) en invierno hasta el 91.3% (91,064.3 dB A) en otoño. Los árboles dispersos no se consideraron ya que la metodología no presenta indicador para este tipo de EVU. Las superficies con pasto representaron contribución a la reducción de ruido principalmente primavera con 65.1% (3,919.1 dB A) y verano con 76.3% (74,170.5 dB A).

Tabla 33. Contribución relativa de reducción de ruido en las cuatro estaciones del año 2020

Tipo EVU	Invierno		Primavera		Verano		Otoño	
	Reducción de ruido (dB Atenuados)	%	Reducción de ruido (dB Atenuados)	%	Reducción de ruido (dB Atenuados)	%	Reducción de ruido (dB Atenuados)	%
Árboles agrupados	13,830.8	72.0	2,099.9	34.9	23,064.8	23.7	91,064.3	91.3
Árboles dispersos	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Pasto	5,366.3	28.0	3,919.1	65.1	74,170.5	76.3	8,677.1	8.7

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Análisis comparativo del Servicio Ecosistémico (SE) de regulación climática: enfriamiento en las cuatro estaciones del año 2020.

En la Tabla 34 se observa la contribución relativa de enfriamiento para las cuatro estaciones del año 2020, su valor está dado por el potencial de enfriamiento. La mayor contribución de enfriamiento en las cuatro estaciones la realizan los árboles dispersos: desde un 48.8% (883.3) en otoño hasta un 78.3% (4,295.9) en verano, seguido de la primavera con un 74.5% (2,068.8); por la importancia de su contribución a la reducción de ruido las áreas con pasto aportaron en primavera con un 18.8% (522.5) y verano el 18.0% (988.9). Los EVU con menor contribución fueron los árboles agrupados en las estaciones: verano desde 3.7% (205.0), primavera 6.7% (186.7), invierno con 8.0% (122.9) hasta otoño con el 44.8% (809.5).

Tabla 34. Contribución relativa de enfriamiento en las cuatro estaciones del año 2020

Tipo EVU	Invierno		Primavera		Verano		Otoño	
	Enfriamiento Reducción de temperatura por la vegetación en el EVU	%	Enfriamiento Reducción de temperatura por la vegetación en el EVU	%	Enfriamiento Reducción de temperatura por la vegetación en el EVU	%	Enfriamiento Reducción de temperatura por la vegetación en el EVU	%
Árboles agrupados	122.9	8.0	186.7	6.7	205.0	3.7	809.5	44.8
Árboles dispersos	1,344.9	87.4	2,068.8	74.5	4,295.9	78.3	883.3	48.8
Pasto	71.6	4.6	522.5	18.8	988.9	18.0	115.7	6.4

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Análisis comparativo del Servicio Ecosistémico (SE) de regulación climática: recreación en las cuatro estaciones del año 2020.

En la Tabla 35 se observa la contribución relativa sobre la recreación en las cuatro estaciones del año 2020, su valor está dado por el potencial de recreación. La mayor contribución de recreación en las cuatro estaciones la realizan los árboles dispersos desde 39.3% (1,899.1) en otoño hasta 80.0% (2,891.5) en invierno, seguido de verano con el 62.1% (9,236.1) y primavera con el 58.1% (4,448.0); por siguiente importancia de contribución a la recreación las áreas con pasto aportaron en invierno desde 10.1% (364.9), otoño con 12.2% (590.0), verano con 33.9% (5,043.6) hasta primavera con 34.8% (2,665.0). La menor contribución de recreación fue por árboles agrupados desde 4.0% (594.0) en verano, 7.1% (541.3) en primavera, invierno con 9.9% (356.5) hasta otoño con 48.5% (2,347.4).

Tabla 35. Contribución relativa de recreación en las cuatro estaciones del año 2020

Tipo EVU	Invierno		Primavera		Verano		Otoño	
	Recreación Índice de recreación/ha	%	Recreación Índice de recreación/ha	%	Recreación Índice de recreación/ha	%	Recreación Índice de recreación/ha	%
Árboles agrupados	356.5	9.9	541.3	7.1	594.6	4.0	2,347.4	48.5
Árboles dispersos	2,891.5	80.0	4,448.0	58.1	9,236.1	62.1	1,899.1	39.3
Pasto	364.9	10.1	2,665.0	34.8	5,043.6	33.9	590.0	12.2

Fuente: Elaboración propia, 2023.

3.4 Propuesta de estrategias para la mitigación de Islas de Calor Urbanas.

3.4.1 Análisis FODA

Para el análisis FODA se consideraron los problemas que se presentan en la ZMCT tanto internos como externos de acuerdo con las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas posibles. A continuación, se describe el análisis FODA en la Tabla 36.

Tabla 36. Matriz FODA para las islas de calor urbanas en la ZMCT

FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<p>F1. La superficie de la ZMCT que no presenta islas de calor es mayor en invierno (52.9%) y primavera (40.4%).</p> <p>F2. Dentro de las categorías moderadamente bajas a altas, el parámetro NDVI (0.4 a 1.0) representa el 47.2% en verano y 31.6% en otoño, siendo los más altos respecto con invierno y primavera.</p> <p>F3. Se presentó un confort climático en las cuatro estaciones dentro de las categorías buenas (<0.1) en la mayor parte de la superficie del área total, siendo otoño la máxima con el 95.6%.</p>	<p>O1. Constancia de los vientos.</p> <p>O2. Alta insolación atmosférica.</p> <p>O3. Elevada altitud.</p> <p>O4. Convergencia de fenómenos tropicales y fríos, que permiten la ventilación y dispersión de la energía calorífica de los contaminantes.</p> <p>O5. Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático (PEACC).</p> <p>O6. En Toluca se implementó el Programa Municipal de Cambio Climático (PROMACC) para identificar la vulnerabilidad climática a nivel delegacional.</p>
DEBILIDADES	AMENAZAS
<p>D1. Las islas de calor de la ZMCT (diferencias mayores a 0°C) se presentan en otoño con un 84.9% respecto con la superficie total y llegan hasta los 6°C en 0.9ha.</p> <p>D2. En las cuatro estaciones, la categoría baja del parámetro NDVI (0.2 a 0.4) presentó la mayor superficie respecto del área total.</p> <p>D3. Las estaciones con menor confort climático fueron primavera (16.4%) y verano (17.2%).</p> <p>D4. No existen inventarios de áreas verdes detalladas y georreferenciadas.</p> <p>D5. Materiales de construcción con albedo bajo.</p>	<p>A1. Expansión de la mancha urbana.</p> <p>A2. Disminución de los cuerpos de agua.</p> <p>A3. Contaminación atmosférica.</p> <p>A4. Deforestación.</p> <p>A5. Inadecuada coordinación entre municipios para implementar medidas de mitigación sobre las ICU.</p> <p>A6. Falta de talleres de concientización a la población en general sobre la importancia de las áreas verdes urbanas para mitigar las ICU.</p>

Fuente: elaboración propia, 2023.

3.4.2 Análisis de estrategias FODA

Para el análisis de estrategias FODA, se determinan mediante una matriz las estrategias FO (Ofensiva), FA(Defensiva), Do (Adaptativa) y DA (De Supervivencia) las cuales permiten realizar propuestas que apoyen al área de estudio (Tabla 37).

Tabla 37. Matriz de Estrategias FODA para la mitigación de islas de calor urbanas

Estrategias FO, para maximizar tanto las Fortalezas como las Oportunidades	Estrategia FA, para maximizar las Fortalezas y minimizar las Amenazas
<p>FO1. Promover la interacción entre las administraciones de los municipios conurbados.</p> <p>FO2. Fomentar la participación transdisciplinaria que pueda crear un enfoque holístico hacia la mitigación de las islas de calor urbanas.</p> <p>FO3. Desarrollo de propuestas que minimicen el gasto público para destinarlo estratégicamente en el problema.</p>	<p>FA1. Generar estrategias que permitan disminuir los niveles de contaminación y a su vez las islas de calor.</p> <p>FA2. Implementar áreas de difusión a programas que apoyen la concientización sobre las áreas verdes urbanas y medidas que la población puede realizar para disminuir los GEI.</p> <p>FA3. Identificar factores de riesgo y jerarquizar las acciones a realizar.</p>
Estrategia DO, para minimizar las Debilidades y maximizar las Oportunidades	Estrategia DA, para minimizar las Debilidades y las Amenazas
<p>DO1. Los fuertes vientos derivados de fenómenos meteorológicos atípicos logran disipar las islas de calor.</p> <p>DO2. Gestión de proyectos enfocados en la colaboración con parques industriales que coadyuven a implementar medidas de mitigación sobre las islas de calor.</p> <p>DO3. Proyectos enfocados a realizar levantamiento de inventarios de áreas verdes para servir como base en proyectos de investigación de servicios ecosistémicos.</p>	<p>DA1. Reemplazar las superficies oscuras, pavimentos, y techos con recubrimientos negros, con superficies de color claro.</p> <p>DA2. Introducir especies de árboles nativos que al crecer tengan mayor dósel arbóreo.</p> <p>DA3. Favorecer la formación de capacitadores que implementen talleres de concientización a la población en general sobre la importancia de las áreas verdes urbanas.</p> <p>DA4. Gestionar apoyos a las instituciones para incentivar el desarrollo de proyectos de investigación que mejoren la calidad de vida.</p> <p>DA5. Promover la reforestación de parques urbanos, que son los que capturan la mayor parte del dióxido de carbono (para evitar que se intensifique el efecto de la isla de calor).</p> <p>DA6. Proponer sobre zonas de aparcamiento que se encuentren descubiertas cuenten por lo menos con un 50 % de sombra.</p>

Fuente: elaboración propia, 2023.

3.4.3 Análisis bajo el Enfoque de Marco Lógico

El Enfoque de Marco Lógico se aplicó en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca, con la finalidad de poder integrar estrategias que minimicen el fenómeno de la Isla de Calor Urbana mediante la utilización de: 1) análisis de involucrados, 2) árbol de problemas, 3) árbol de objetivos y 4) matriz de planificación.

3.4.3.1 Análisis de involucrados

Con el análisis de involucrados (*stakeholders*) se identificó a todos aquellos que pueden llegar a tener interés o un beneficio directo/indirecto del proyecto y a diferentes escalas. Posteriormente se analizaron sus intereses y expectativas, lo cual permite aprovechar y potenciar el apoyo de los involucrados con intereses similares o complementarios al proyecto, además de la disminución de aquellos con intereses en contra para finalmente conseguir el apoyo de quienes son indiferentes (véase Figura 51).

Figura 51. Identificación de los involucrados



Fuente: elaboración propia, 2023.

Tabla 38. Identificación de actores y roles, así como su tipología.

Actor / grupo de actores	Rol (papel en el proyecto)	Directo/ indirecto	Tipología de actores POSICIÓN (aliado/neutro/ adversario)
1.- Organizaciones No Gubernamentales (ONG's)	Persiguen modelos de desarrollo sostenible, uno de ellos es el Acuerdo de París; que busca el mantener el aumento de la temperatura mundial en este siglo por debajo de los 2 grados centígrados.	Indirecto	Aliado
2.- Secretaría de Desarrollo Urbano (Gobierno del Estado de México)	Integra políticas, estrategias y acciones para fortalecer el ordenamiento territorial.	Directo	Neutro
3.- Dirección General de Planeación y Gasto Público (Gobierno del Estado de México)	La inversión pública se encuentra regulada por leyes, normas y procedimientos, que determinan lo viable y lo que está prohibido, responsables y montos autorizados, actividades permitidas y requisitos que deben cumplir.	Directo	Neutro
4.- Secretaría de Medio Ambiente (Gobierno del Estado de México)	Participa en conjunto el Gobierno Federal, las Entidades Federativas y los Municipios del Estado, así como con particulares, para la realización conjunta y coordinada de acciones de protección ambiental.	Directo	Aliado
5.- Instituto Estatal de Energía y Cambio Climático (Gobierno del Estado de México)	Desarrolla investigación científica y tecnológica en materia de cambio climático, eficiencia energética y energías renovables.	Directo	Aliado
6. Dirección General de Ordenamiento e Impacto Ambiental (Gobierno del Estado de México)	Realiza diagnósticos en materia de impacto y riesgo ambiental, identificando las obras o actividades que generen impacto o afectación al ambiente, la salud, los bienes y la integridad física de los habitantes de la entidad.	Directo	Aliado
7. Desarrollo Urbano y Obra Pública (Gobierno Municipal)	Puede colaborar con la Secretaría de Desarrollo Urbano y Obra en el diseño estratégico de áreas verdes, así como la gestión y ejecución de la obra urbana.	Directo	Aliado
8. Dirección General de Medio Ambiente (Gobierno Municipal)	Ejecuta medidas y políticas públicas encaminadas a la protección y desarrollo sustentable del medio ambiente. Promueve, fomenta y difunde la cultura ambiental.	Directo	Aliado
9.- Sector privado	Pueden ver afectadas sus actividades y mostrar nulo interés en colaborar en el proyecto debido a que están enfocados en su giro.	Indirecto	En contra
10.- Comunidad científica	Aportan conocimientos y desarrollo al proyecto.	Indirecto	Aliado
11.- Grupos ecologistas	Población que apoya y fomenta la cultura ambiental.	Indirecto	Aliado
12.- Población	Población favorecida por el proyecto, apoyaría la ampliación.	Directo	Aliado

Fuentes: elaboración propia, 2023.

3.4.3.2 Posicionar y caracterizar a los involucrados

En la Tabla 39 se definió para cada involucrado: 1) su interés/expectativa, 2) importancia para la operación del proyecto, 3) fuerza para defender intereses y 4) posición. De tal manera que el interés/expectativa indica cuál es el apoyo u oposición al proyecto por parte del involucrado, la importancia para la operación del proyecto es el valor que el involucrado representa. La fuerza para defender intereses representa la significancia-interés que el involucrado le daría al proyecto. Los actores/grupos cinco, siete y ocho tuvieron la posición más alta.

Tabla 39. Matriz de expectativas – fuerzas

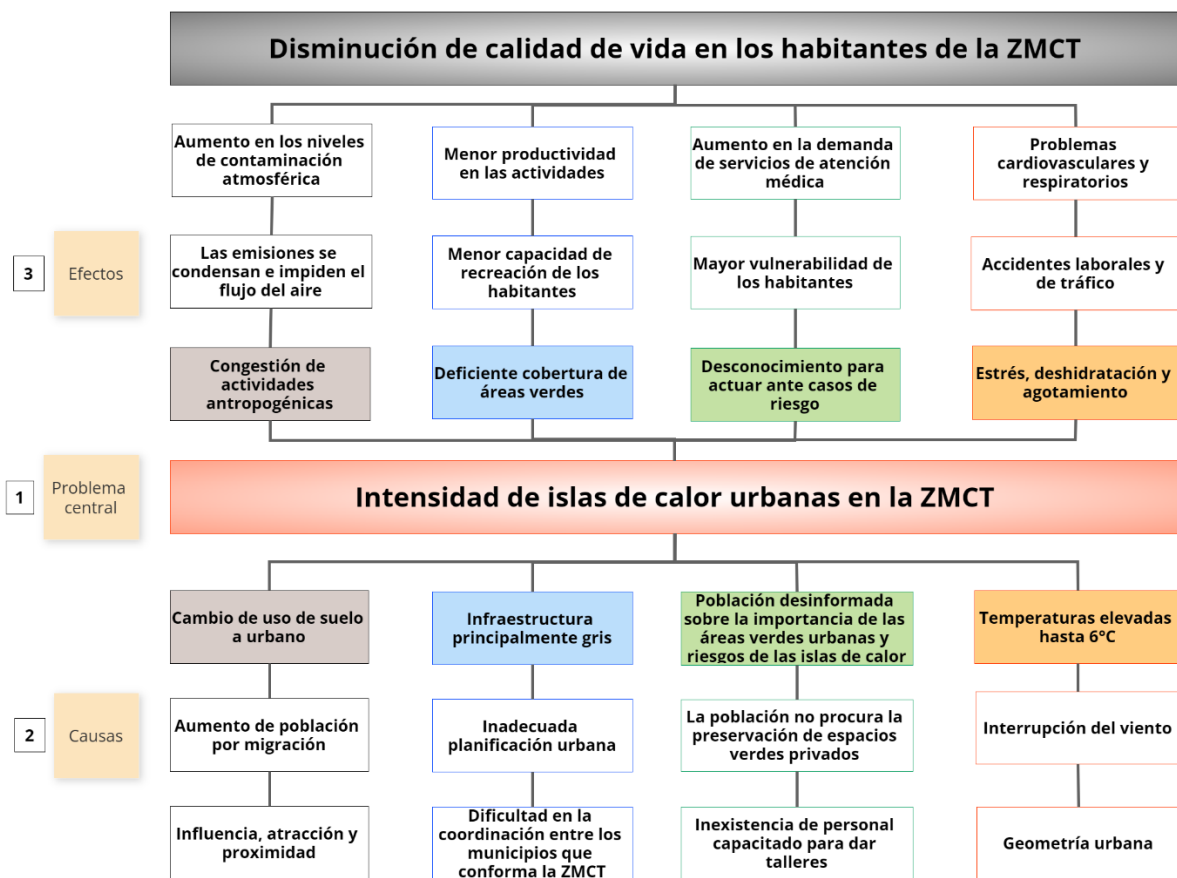
Actor / grupo	Interés / Expectativa	Importancia para la operación del proyecto (A)	Fuerza para defender intereses (B)	Posición (A x B)
1.- Organizaciones No Gubernamentales (ONG's)	Aliado	5	2	10
2.- Secretaría de Desarrollo Urbano (Gobierno del Estado de México)	Neutro	5	3	15
3.- Dirección General de Planeación y Gasto Público (Gobierno del Estado de México)	Neutro	5	2	10
4.- Secretaría de Medio Ambiente (Gobierno del Estado de México)	Aliado	5	3	15
5.- Instituto Estatal de Energía y Cambio Climático (Gobierno del Estado de México)	Aliado	5	4	20
6. Dirección General de Ordenamiento e Impacto Ambiental (Gobierno del Estado de México)	Aliado	5	3	15
7. Desarrollo Urbano y Obra Pública (Gobierno Municipal)	Aliado	5	4	20
8. Dirección General de Medio Ambiente (Gobierno Municipal)	Aliado	5	4	20
9.- Sector privado	En contra	5	1	5
10.- Comunidad científica	Aliado	5	3	15
11.- Grupos ecologistas	Aliado	5	3	15
12.- Población	Aliado	5	3	15

Fuente: elaboración propia, 2023.

3.4.4 Árbol de problemas

Mediante la identificación de los principales retos que presenta la zona de estudio se elaboró el árbol de problemas, al establecer la jerarquía de estos e identificar las relaciones existentes, así como las causas y los efectos. Para identificar y construir el árbol de problemas se utilizaron las siguientes fuentes: los resultados obtenidos de las Islas de Calor Urbanas, el trabajo de campo y el Censo de Población y Vivienda 2020. En la Figura 52 se representa de manera general los problemas y la estructura que muestran al interior de la ZMCT.

Figura 52. Árbol de problemas, causas y efectos.

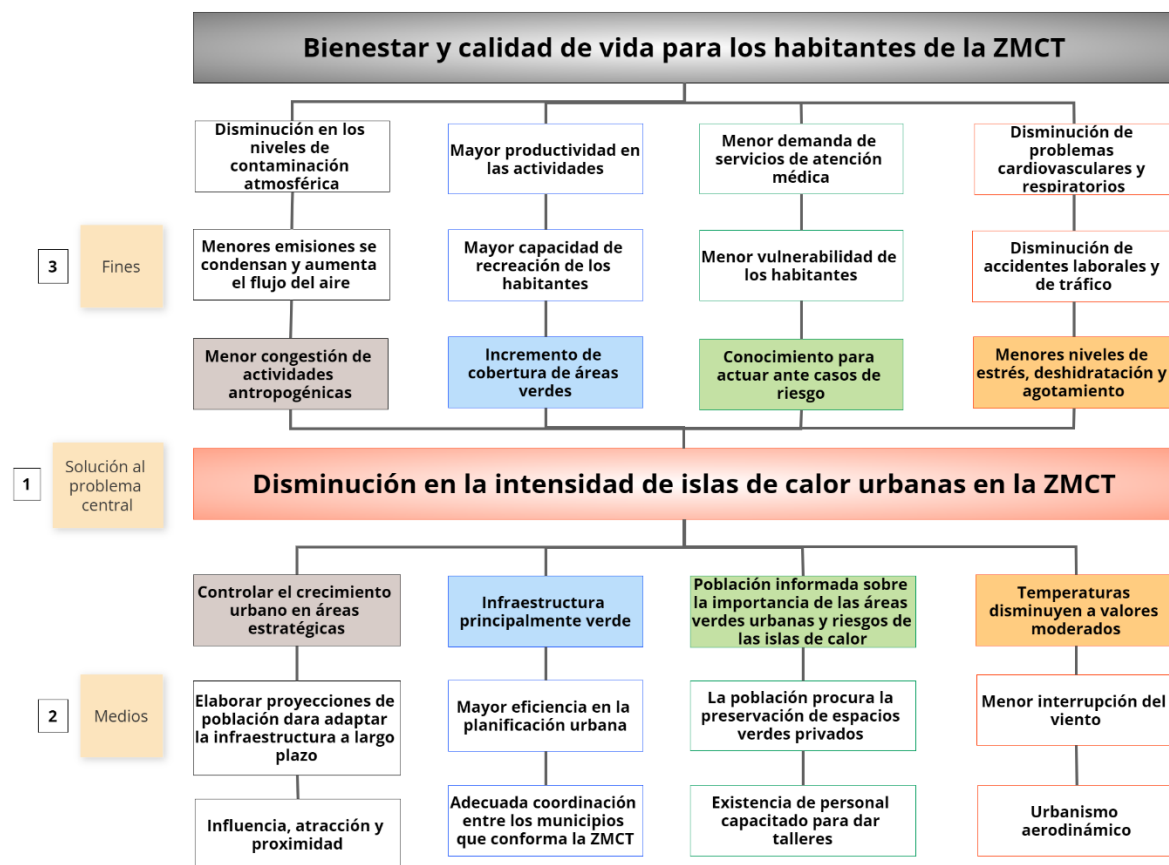


Fuente: elaboración propia, 2023.

3.4.5 Árbol de objetivos

En el árbol de objetivos (Figura 53) se describen los objetivos para poder plantear la solución al problema central a través de la transformación de causas en posibles medios y cómo estos medios permiten el bienestar y calidad de vida de los habitantes de la ZMCT, siempre tomando en consideración aspectos socioeconómicos y ambientales.

Figura 53. Árbol de objetivos.



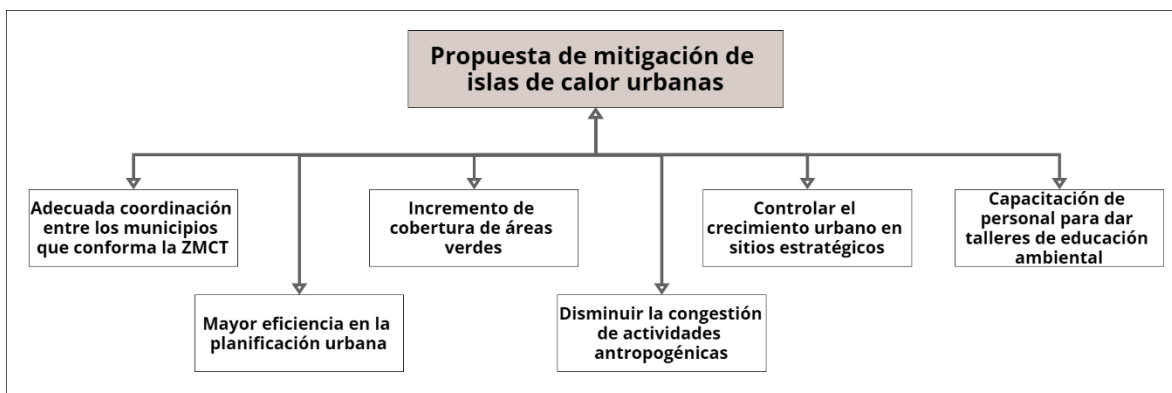
Fuente: elaboración propia, 2023.

3.4.6 Análisis de alternativas

Para construir las alternativas, se utilizó como base el árbol de objetivos. Este análisis permite: 1) identificar soluciones alternativas que puedan llegar a ser estrategias del programa o proyecto, 2) evaluar las posibles estrategias y 3) determinar la estrategia a ser adoptada por el proyecto.

A continuación, en la Figura 54 se presentan las metas que contienen objetivos debido a su importancia seleccionados como posibles alternativas que realicen una aportación significativa a la solución del problema.

Figura 54. Diagrama de análisis de alternativas



Fuente: elaboración propia, 2023.

3.4.7 Evaluación cualitativa y cuantitativa de las alternativas

Las alternativas se evaluaron mediante criterios de tipo cualitativo y cuantitativo para poder identificar la viabilidad de cada estrategia y calificándolas con una escala de cinco categorías. Los componentes para la evaluación de las alternativas consistieron en: la posible disposición de la población y los municipios que conforman la ZMCT, además de la aparición de factores externos que puedan llegar a afectar de forma directa el desarrollo de las alternativas. A continuación, en la tabla 40 se muestran las estrategias evaluadas cualitativamente:

Tabla 40. Evaluación cualitativa de las alternativas

Estrategia	Criterios					
	Económico	Social	Ambiental	Viabilidad política	Legal	Tiempo
Adecuada coordinación entre los municipios que conforma la ZMCT	Medio	Medio	Alto	Medio	Medio	Medio
Mayor eficiencia en la planificación urbana	Muy bajo	Alto	Medio	Medio	Alto	Medio
Incremento de cobertura de áreas verdes	Medio	Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Medio
Disminuir la congestión de actividades antropogénicas	Bajo	Medio	Medio	Medio	Alto	Bajo
Controlar el crecimiento urbano en sitios estratégicos	Alto	Bajo	Medio	Bajo	Alto	Muy bajo
Capacitar personal para dar talleres de educación ambiental	Alto	Muy alto	Alto	Alto	Alto	Medio

Fuente: elaboración propia, 2023.

Para la evaluación cuantitativa, se obtuvieron los valores mediante la asignación de números con escala de 1 a 5 de acuerdo con las evaluaciones cualitativa previamente realizadas en la Tabla 41, posteriormente se integró un coeficiente a cada criterio partiendo de la relevancia que representan en el desarrollo de las alternativas.

Se reutilizó la misma escala de valoración siendo el valor 1 el de menor importancia y el 5 corresponde a mayor importancia. Finalmente se realizó la multiplicación del valor asignado a cada alternativa por el coeficiente para obtener la valoración de cada alternativa. A continuación, se muestra en la tabla 42:

Tabla 41. Evaluación por criterios de viabilidad de las alternativas

Estrategia	Económico		Social		Ambiental		Viabilidad política		Legal		Tiempo		Total
	Coef.		Coef.		Coef.		Coef.		Coef.		Coef.		
	4	12	5	15	4	16	3	9	2	6	2	6	
Adecuada coordinación entre los municipios que conforma la ZMCT	3	12	3	15	4	16	3	9	3	6	3	6	64
Mayor eficiencia en la planificación urbana	1	4	4	20	3	12	3	9	4	8	3	6	59
Incremento de cobertura de áreas verdes	3	12	4	20	5	20	5	15	5	10	3	6	83
Disminuir la congestión de actividades antropogénicas	2	8	3	15	3	12	3	9	4	8	2	4	56
Controlar el crecimiento urbano en sitios estratégicos	4	16	2	10	3	12	2	6	4	8	1	2	54
Capacitar personal para dar talleres de educación ambiental	4	16	5	25	4	16	4	12	4	8	3	6	83

Fuente: elaboración propia, 2023.

3.4.8 Matriz de Indicadores para Resultados (MIR)

Dentro de la estructura analítica del proyecto se espera coherencia interna del mismo y que las alternativas seleccionadas lleven al cumplimiento del objetivo, así como la solución del problema previamente identificado. Para la primera fase (Tabla 42), en el Resumen Narrativo se redactaron positivamente los objetivos que se esperan en cada nivel de la MIR. Se siguieron las reglas de sintaxis para poder garantizar que los objetivos se adecuen a cada nivel de la MIR.

Tabla 42. Resumen Narrativo en los cuatro niveles de la MIR

Nivel de la MIR	Resumen Narrativo
Fin	Contribuir al bienestar y calidad de vida de los habitantes de la ZMCT mediante el incremento en la cobertura de áreas verdes y coordinación entre los municipios conurbados para una mayor eficiencia en la planificación urbana.
Propósito (objetivo general)	La población de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca se beneficia con la presencia de infraestructura verde urbana.
Componentes (Objetivos específicos)	C.1. Adecuada coordinación entre los municipios que conforma la ZMCT. C.2. Mayor eficiencia en la planificación urbana. C.3. Incremento de cobertura de áreas verdes. C.4. Disminuir la congestión de actividades antropogénicas. C.5. Controlar el crecimiento urbano en sitios estratégicos. C.6. Capacitar personal para dar talleres de educación ambiental.
Actividades	A.1.1 Implementación de un modelo de gestión para llevar a cabo una asociación entre municipios.
	A.1.2 Contratación de financiamiento para la asociación.
	A.2.1 Construcción de un modelo de planificación urbana sostenible.
	A.3.1 Introducir especies de árboles nativos que al crecer tengan mayor dósel arbóreo.
	A.4.1 Implementar esquemas de planificación del espacio y el transporte para garantizar la accesibilidad
	A.5.1 Elaborar modelos de proyección poblacionales para implementar y lograr adecuar la infraestructura a largo plazo.
	A.6.1 Impartición de talleres dirigidos a la población en general sobre los riesgos de las islas de calor
	A.6.2 Impartición de talleres a la población en general sobre educación ambiental.

Fuente: elaboración propia, 2023.

3.4.8.1 Indicadores de desempeño

Los indicadores contribuyen a la comprensión del desempeño de una iniciativa que está siendo evaluada. Su importancia radica en el análisis y diálogo sobre los logros de las políticas, programas y proyectos por su carácter descriptivo y explicativo (Mokate, 2003). A continuación, se muestran los indicadores de desempeño en la Tabla 43.

Tabla 43. Indicadores de desempeño

Resumen Narrativo	Indicadores
F. Contribuir al bienestar y calidad de vida de los habitantes de la ZMCT mediante el incremento en la cobertura de áreas verdes y coordinación entre los municipios conurbados para una mayor eficiencia en la planificación urbana.	I.F. Índice de Sustentabilidad Ambiental de la ZMCT.
O.G. La población de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca se beneficia con la presencia de infraestructura verde urbana.	I.OG. Porcentaje de satisfacción de la población de la ZMCT sobre la presencia de infraestructura verde urbana.
C.1. Adecuada coordinación entre los municipios que conforma la ZMCT.	I.C.1. Porcentaje de satisfacción de los habitantes sobre la coordinación entre los municipios.
C.2. Mayor eficiencia en la planificación urbana.	I.C.2. Porcentaje de satisfacción de los habitantes sobre las obras públicas.
C.3. Incremento de cobertura de áreas verdes.	I.C.3. Porcentaje del territorio de la ZMCT que cuenta con áreas verdes.
C.4. Disminuir la congestión de actividades antropogénicas.	I.C.4. Porcentaje del territorio de la ZMCT que presenta islas de calor.
C.5. Controlar el crecimiento urbano en sitios estratégicos.	I.C.5. Porcentaje de crecimiento vertical y optimización de espacios.
C.6. Capacitar personal para dar talleres de educación ambiental.	I.C.6. Porcentaje de personal aprobado en los talleres de capacitación y concientización.
A.1.1 Implementación de un modelo de gestión para llevar a cabo una asociación entre municipios.	I.A.1.1 Porcentaje de participación de los municipios conurbados.
A.1.2 Contratación de financiamiento para la asociación.	I.A.1.2 Porcentaje de autofinanciamiento de la asociación sobre los costos de operación que generó la prestación del servicio posterior a la contratación de financiamiento.
A.2.1 Construcción de un modelo de planificación urbana sostenible.	I.A.2.1 Porcentaje de sostenibilidad en la ZMCT.
A.3.1 Introducir especies de árboles nativos que al crecer tengan mayor dósel arbóreo.	I.A.3.1 Porcentaje de árboles nativos en la ZMCT.
A.4.1 Implementar esquemas de planificación del espacio y el transporte para garantizar la accesibilidad.	I.A.4.1 Porcentaje de interacción espacial.
A.5.1 Elaborar modelos de proyección poblacionales para implementar y lograr adecuar la infraestructura a largo plazo.	I.A.5.1 Grado de satisfacción de los ciudadanos en relación con el medio urbano en el que realizan sus actividades
A.6.1 Impartición de talleres dirigidos a la población en general sobre los riesgos de las islas de calor.	I.A.6.1 Porcentaje de personas que asisten a los talleres.
A.6.2 Impartición de talleres a la población en general sobre educación ambiental.	I.A.6.2 Porcentaje de personas que asisten a los talleres.

Fuente: elaboración propia, 2023.

3.4.8.2 Medios de verificación

Los medios de verificación permiten saber de dónde se obtendrán las pruebas con referencia a los avances y logros de un proyecto, de tal forma que se verifica la aplicación de los indicadores con base en datos obtenidos. En la Tabla 44 se muestran los medios de verificación identificados para cada indicador.

Tabla 44. Medios de verificación

Indicadores	Medios de verificación
I.F. Índice de Sustentabilidad Ambiental de la ZMCT.	MV.F Estadísticas anuales de seguimiento a la Sustentabilidad Ambiental de la ZMCT.
I.OG. Porcentaje de satisfacción de la población de la ZMCT sobre la presencia de infraestructura verde urbana.	MV.OG. Encuestas de satisfacción a la población de la ZMCT posteriores a la implementación de la infraestructura verde.
I.C.1. Porcentaje de satisfacción de los habitantes sobre la coordinación entre los municipios.	MV.C1 Encuestas de satisfacción dirigidas a adultos sobre el nivel de coordinación entre los municipios.
I.C.2. Porcentaje de satisfacción de los habitantes sobre las obras públicas.	MV.C2 Encuestas de satisfacción dirigidas a adultos sobre su percepción de las obras públicas.
I.C.3. Porcentaje del territorio de la ZMCT que cuenta con áreas verdes.	MV.C3 Productos cartográficos.
I.C.4. Porcentaje del territorio de la ZMCT que presenta islas de calor.	MV.C4 Análisis mediante técnicas de teledetección.
I.C.5. Porcentaje de crecimiento vertical y optimización de espacios.	MV.C5 Estudios urbanos y estadísticos.
I.C.6. Porcentaje de personal aprobado en los talleres de capacitación y concientización.	MV.C6 Resultado de examen de capacitación para evaluar los conocimientos adquiridos.
I.A.1.1 Porcentaje de participación de los municipios conurbados.	MV.A.1.1 Actas que deberán contener la fecha, hora y lugar de la reunión, los nombres de los asistentes y darán cuenta del desarrollo de la sesión y de los acuerdos que se tomen.
I.A.1.2 Porcentaje de autofinanciamiento de la asociación sobre los costos de operación que generó la prestación del servicio posterior a la contratación de financiamiento.	MV.A.1.2 Informes de incremento en la base de contribuyentes.
I.A.2.1 Porcentaje de sostenibilidad en la ZMCT.	MV.A.2.1 Reporte de monitoreo del éxito y el impacto de las intervenciones de sostenibilidad.
I.A.3.1 Porcentaje de árboles nativos en la ZMCT.	MV.A.3.1 Inventarios de áreas verdes.
I.A.4.1 Porcentaje de interacción espacial.	MV.A.4.1 Cartografía y geoestadística.
I.A.5.1 Grado de satisfacción de los ciudadanos en relación con el medio urbano en el que realizan sus actividades	MV.A.5.1 Encuestas de satisfacción con el entorno urbano.
I.A.6.1 Porcentaje de personas que asisten a los talleres.	MV.A.6.1 Lista de asistencia.
I.A.6.2 Porcentaje de personas que asisten a los talleres.	MV.A.6.2 Lista de asistencia.

Fuente: elaboración propia, 2023.

3.4.8.3 Supuestos

Existen factores externos que se llaman Supuestos (dentro de esta metodología) que no se pueden controlar por el ejecutor del proyecto, pero es necesario que ocurran para lograr que los objetivos se cumplan. Al identificarse un grado de incertidumbre, se puede llegar a replantear o modificar el proyecto para incorporar acciones que no se contemplaron. Se considera dentro de una etapa de monitoreo. Se observan en la Tabla 45.

Tabla 45. Supuestos

Medios de verificación	Supuestos o hipótesis
MV.F Estadísticas anuales de seguimiento a la Sustentabilidad Ambiental de la ZMCT.	S.F. La población de la ZMCT se beneficia de una ciudad más resiliente ante riesgos climáticos.
MV.OG. Encuestas de satisfacción a la población de la ZMCT posteriores a la implementación de la infraestructura verde.	S.OG. Población de la ZMCT satisfecha con la implementación de infraestructura verde.
MV.C1 Encuestas de satisfacción dirigidas a adultos sobre el nivel de coordinación entre los municipios.	S.C1 Población adulta de la ZMCT satisfecha con el grado de coordinación entre los municipios.
MV.C2 Encuestas de satisfacción dirigidas a adultos sobre su percepción de las obras públicas.	S.C2 Población adulta de la ZMCT satisfecha con las obras públicas.
MV.C3 Productos cartográficos.	S.C3 Territorio de la ZMCT con mayor presencia de infraestructura verde.
MV.C4 Análisis mediante técnicas de teledetección.	S.C4 Islas de calor disminuidas en el territorio de la ZMCT.
MV.C5 Estudios urbanos y estadísticos.	S.C5 El territorio de la ZMCT presenta crecimiento vertical y evita el crecimiento desordenado.
MV.C6 Resultado de examen de capacitación para evaluar los conocimientos adquiridos.	S.C6 Personal altamente capacitado en conocimientos de educación ambiental.
MV.A.1.1 Actas que contienen fecha, hora y lugar de la reunión, los nombres de los asistentes y dan cuenta del desarrollo de la sesión y de los acuerdos que se tomen.	S.A.1.1 Los municipios que conforma la ZMCT son altamente participativos en las sesiones de la Asociación.
MV.A.1.2 Informes de incremento en la base de contribuyentes.	S.A.1.2 Los municipios obtienen autofinanciamiento por parte del incremento en la base de contribuyentes.
MV.A.2.1 Reporte de monitoreo del éxito y el impacto de las intervenciones de sostenibilidad.	S.A.2.1 El territorio de la ZMCT es sostenible en sus diferentes aspectos sociales, económicos y ambientales
MV.A.3.1 Inventarios de áreas verdes.	S.A.3.1 Cada municipio tiene un inventario de áreas verdes detallado y georreferenciado.
MV.A.4.1 Cartografía y geoestadística.	S.A.4.1 La población de la ZMCT presenta mayor accesibilidad en sus actividades diarias.
MV.A.5.1 Encuestas de satisfacción con el entorno urbano.	S.A.5.1 Los ciudadanos de la ZMCT se muestran satisfechos con su entorno urbano.
MV.A.6.1 Lista de asistencia.	S.A.6.1 Población de la ZMCT altamente participativa en temas de riesgos de las islas de calor.
MV.A.6.2 Lista de asistencia.	S.A.6.2 Población de la ZMCT altamente participativa en cultura ambiental.

Fuente: elaboración propia, 2023.

3.5 Discusión General

Intensidad de islas de calor urbanas

La superficie de las ICU durante la temporada invernal estuvo en su nivel más bajo, cubriendo 15.498,81 hectáreas con una temperatura máxima de 4°C en algunas localidades. La intensidad fue relativamente baja en el norte, noreste, este, sur y oeste, donde se ubican la mayoría de las unidades residenciales y algunos parques industriales. La investigación de Jáuregui (1979) identificó un pico de 4,5 a 5°C el 3 de febrero de 1977. De manera similar, Morales et al. (2007) observaron una diferencia térmica de 3°C entre el centro de la ciudad y las afueras el 13 de enero de 2005, que aumentó 1°C en el invierno de 2020. Martínez (2022) comparó las islas de calor observadas durante los años 2018, 2019 y 2020, y encontró que el valor más alto se registró en 2018, con un valor LST de 32,76°C.

En primavera, un total de 19.584,81 hectáreas con intensidades superiores a 4°C se distribuyen en el norte, noreste, este y sureste, donde se ubican viviendas, parques industriales y zonas agrícolas. Esta investigación es la primera en realizar observaciones de campo en la ZMCT a partir de islas de calor identificadas previamente a detalle utilizando una resolución de imagen de 30 m; la observación realizada en primavera destaca una escasa vegetación y materiales de construcción, junto con el calor producido por las fábricas, facilita una mejor comprensión de los hallazgos. Por otro lado, el valor observado contrasta con la intensidad máxima de 13.1°C, reportada para la misma temporada el 21 de abril de 2014, por Rivera et al. (2017), quienes utilizaron el valor de la misma estación meteorológica para calcular la intensidad ICU y lo dedujeron de todas las imágenes para adquirir la intensidad ICUS.

Para la estación de verano se distribuyó una superficie de 24.583,98 hectáreas al este, sureste y oeste entre parques industriales y viviendas de alta densidad de población. La temperatura más alta registrada fue de 5°C, coincidiendo con el valor máximo obtenido por Romero, Morales y Antonio (2011) durante la misma estación de 2009. Romero et al. (2007) observaron una diferencia térmica de 2°C entre el centro y la periferia, lo que indica un aumento de 3°C para 2020. Los datos de esta estación no muestran similitud con la temperatura más alta (19,2°C) reportada en la misma fecha. (26 de julio) en 2014, como lo observaron Rivera et al. (2017). Martínez (2022) señaló que en 2018 se produjo un efecto

isla de calor urbano particularmente fuerte, con valores de temperatura de la superficie terrestre que alcanzaron un máximo de 40,79°C. Por el contrario, las temperaturas más bajas del verano se registraron en 2020, alcanzando solo 35,6°C.

Los patrones identificados en la estacionalidad de IICU indican que la mayor superficie de IICU se observó en otoño, cubriendo un área de 27.967,77 ha. Estas zonas están situadas en las regiones centro, noreste y este, donde prevalecen corredores industriales y unidades habitacionales. Además, estos sitios de la ZMCT muestran una intensidad máxima de 6°C. El resultado de esta estación no mostró similitud con la temperatura más alta registrada (17,2°C) en la misma estación (30 de octubre) en 2014 reportada por Rivera et al. (2017).

Índice de Varianza del Campo Térmico Urbano (UTFVI)

De acuerdo con la búsqueda de antecedentes, no se encontraron estudios previos en la zona de estudio y tampoco en ciudades mexicanas que permitan contrastar los resultados. Sin embargo, en las investigaciones de Degerli y Cetin (2023), Nasar-U-Minallah et. al (2023) y Zhang et al. (2023) encontraron que la vulnerabilidad urbana y confort climático que mide este índice se reduce a medida que los valores de la ICU son bajos en zonas verdes, húmedas y distritos rurales, mientras que aumenta en los puntos más calientes. Misma situación que se presentó en la ZMCT durante el año 2020, donde el confort climático más bajo se puede identificar principalmente en verano y el otoño.

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Con relación al cálculo de NDVI sobre estudios locales, en la investigación de Martínez (2022) se utilizó el NDVI para comparar las temperaturas con el uso de suelo, sin embargo, la resolución de un kilómetro cuadrado de superficie no permitió identificar de manera específica los diferentes elementos urbanos y rurales que conforman los municipios estudiados.

En este caso de la ZMCT, se calculó el NDVI para las cuatro estaciones, identificando las estaciones de verano y otoño con mayor superficie de vegetación en comparación con invierno y primavera. No obstante, verano y otoño fueron las estaciones con mayor presencia y distribución de Intensidad de las Islas de Calor Urbanas (IICU), por lo que se requiere aplicar diferentes técnicas de análisis a futuro para comprender este patrón.

Servicios Ecosistémicos (SE) de regulación climática

Al igual que con el cálculo del UTFVI, tampoco se encontraron estudios previos que relacionaran los servicios ecosistémicos de regulación climática con las islas de calor urbanas. En estudios internacionales como el de Ramyar et al. (2020) en la ciudad de Tehrán evaluaron los servicios ecosistémicos proporcionados por los espacios verdes, con la diferencia de que estimaron y cuantificaron las superficies a necesitarse a futuro de acuerdo con un plan, así como las deficiencias actuales en relación con la población. Se coincide que la cantidad y capacidad de enfriamiento depende de la densidad del dosel y la superficie del área verde.

De Manuel et al. (2021) para la ciudad de Bilbao, España, midieron tres servicios ecosistémicos (SE), de los cuales calcularon la oferta y la demanda de la purificación del aire y enfriamiento, logrando determinar que los espacios verdes urbanos no satisfacen la demanda de SE por el desajuste en la oferta. Dos de estos SE, se cuantificaron en la ZMCT para las cuatro estaciones del 2020 únicamente en su oferta (capacidad de proveer enfriamiento, capturar carbono, reducir el ruido y de recreación). La mayor parte de la contribución (oferta) en la captura de carbono, enfriamiento y recreación la realizaron los árboles dispersos, mientras que la mayor contribución en la reducción de ruido fue por árboles agrupados.

Enfoque de Marco Lógico

Este enfoque tan completo permite establecer propuestas con una planificación estructurada en diversas áreas del conocimiento. Aunque tampoco se encontraron estudios locales sobre su aplicación sobre la mitigación de islas de calor urbanas, se establece como un primer acercamiento hacia esta aplicación que permite establecer propuestas formales de mitigación y planificación, siendo en específico el caso de la ZMCT.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El uso de la ecuación de desviación estándar en las imágenes del Landsat-8, que posee una resolución de 30 metros, resultó adecuado para la escala del área MZTC. Este método permitió la identificación precisa de la ocurrencia de IICU en distintas regiones de la MZTC durante las cuatro estaciones del año 2020. Aunque las islas de calor se encontraron predominantemente en áreas industriales, no se debe inferir que son las únicas responsables del efecto IICU. Incluso las zonas verdes utilizadas con fines industriales pueden generar calor y disiparlo incluso cuando hay vegetación.

En cuanto a las limitaciones de la metodología elegida, se ha reconocido que no se puede establecer una comparación del comportamiento nocturno con el diurno debido a la falta de imágenes térmicas de satélite con la misma resolución de 30 metros. Se requiere más investigación para explorar la relación entre las islas de calor y las cuarentenas derivadas de pandemias como la COVID-19, dado que las actividades restringidas y el aislamiento podrían afectar potencialmente los resultados del IICU. Por último, es necesario crear medidas cualitativas y cuantitativas para representar con precisión la presencia y el desarrollo de IICU.

La relación encontrada entre las islas de calor y los servicios ecosistémicos implica la reducción de servicios ecosistémicos durante la presencia de islas de calor lo cual conlleva a identificar que las políticas urbanas no han sido óptimas para mitigar los impactos de las islas de calor urbanas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca. Sobre ello, esta tesis pretendió mostrar un punto de partida para que las autoridades de los municipios implicados puedan tomar planes de acción y gestionen la implementación de nuevos EVU de acuerdo con las AGEB de las diferentes estaciones que muestran una reducción del suministro en los cuatro tipos de SE.

Por otro lado, es crucial contar con inventarios geoespaciales de EVU a detalle para poder contar con resultados mejor precisos y menos relativos. Los valiosos hallazgos permitirán a las autoridades competentes, como los planificadores urbanos y los responsables de la formulación de políticas, aplicar medidas para mitigar las islas de calor urbanas en las zonas donde existe este fenómeno recurrente.

REFERENCIAS

- Aquino, D. D. N., Rocha Neto, O. C. D., Moreira, M. A., Teixeira, A. D. S., & Andrade, E. M. D. (2018). Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region. *Revista Ciência Agronômica*, 49, 420-429.
- Aragón, J. A., Rodríguez, E. D., Varon, G. A., & Sánchez, G. A. (2020). *Análisis de islas de calor por medio de imágenes satelitales y sistemas de información geográficos en el área urbana de la Sabana de Bogotá*. *Geographicalia*, (72), 39-64.
- Alanís Navarro, J. A., Casarrubias-Bahena, D., Alanís-Cantú, R., & Lavín Delgado, J. (2017). *Correlación y regresión lineal de variables climatológicas para el diseño ecotecnologías y arquitectura bioclimática*. *Diseño*, 1(2), 1-12.
- Balzan, M. et al. (2021). Assessing urban ecosystem services to prioritise nature-based solutions in a high-density urban area. *Nature-Based Solutions*, 1, 100007.
- Balvanera, P., H. Cotler. (2011). *Los servicios ecosistémicos*. CONABIO. *Biodiversitas*, 94:7-11
- Bermúdez, G. E. S. (2020). *Gestión del impacto ambiental en proyectos de infraestructura vial urbana en la zona de reserva ecológica Jardín Botánico y San Jorge, en la ciudad de Ibagué. Estudio de caso vía carrera 13 Calambeo*. (Tesis de maestría en Gestión Urbana) Universidad Piloto de Colombia, Bogotá
- Álvarez, L. M. B., León, M. I., & Suárez, G. S. (2015). *El desarrollo sustentable en la universidad cubana. Algunas reflexiones*. *Revista Universidad y Sociedad*, 7(1), 78-85
- Achkar, M., Cantón, V., Cayssials R., Domínguez, A., Fernández, G. & Pesce, F. (2005). Indicadores de sustentabilidad (No. 911.37 (899) ORD).
- Brundtland, G. (1987). *Nuestro Futuro Común (Informe Brundtland)*. Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo de la ONU.
- Canada Centre for Remote Sensing, (2016). *Fundamentals of Remote Sensing*. Natural Resources Canada. Disponible en: https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutorial/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf
- Carson, R. (1964). *Primavera silenciosa: Libros de la naturaleza*. Barcelona: Editor Luis de Carol.
- Casadei, P., Semmartin, M., & Garbulsky, M. F. (2021). *Análisis regional de las islas de calor urbano en la Argentina*. *Ecología Austral*, 31(1), 190-203.
- Casas et al. (2017). Ciencia para la sustentabilidad: investigación, educación y procesos participativos. *Revista mexicana de biodiversidad*, 88(Supl. dic), 113-128. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.003>

- Camacho, H., Cámara, L., Cascante, R., & Sainz, H. (2001). *El Enfoque del marco lógico: 10 casos prácticos. Cuaderno para la identificación y diseño de proyectos de desarrollo*. Madrid, España, Fundación CIDEAL.
- Cámara de Diputados, (2007). *Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012*. Diario Oficial de la Federación, 31, 259-269.
- Cámara de Diputados, (2015). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Última reforma*. Diario Oficial de la Federación. 9 de enero de 2015
- CentroGeo, (s.f). Ciencias de Información Geoespacial. Consultado el 16 de octubre de 2021. Disponible en: <https://www.centrogeo.org.mx/archivo/archivo-centrogeo/centrogeo-relevante/1365-ciencias-de-informacion-geoespacial-definicion/file>
- Chaudhuri, S., & Kumar, A. (2021). *Evaluating the contribution of urban ecosystem services in regulating thermal comfort*. *Spatial Information Research*, 29, 71-82.
- Centro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para América Latina y el Caribe. (2020). *Servicios Ecosistémicos Urbanos en Latinoamérica. Oportunidades para el Desarrollo Urbano Sostenible, la Acción Climática y la Gestión de la Biodiversidad Urbana*. No 4. Recuperado de https://cods.uniandes.edu.co/wp-content/uploads/2020/01/Documento_CODS_ecosistemicos_enero20-1.pdf
- Cordero, G. D. (2012). El cambio climático. *Ciencia y sociedad*, 37(2), 227-240.
- Corrales, L., & Brenes, C. (2019). *Islas de calor, impactos y respuestas: el caso del cantón de Curridabat*.
- Dávila, S. R., Méndez, C. C. M., & Némiga, X. A. (2011). *Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México*. *Revista de climatología*, 11.
- Damián, Araceli. (2015). *Crisis global, económica, social y ambiental*. *Estudios demográficos y urbanos*, 30(1), 159-199. Recuperado en 23 de noviembre de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-72102015000100159&lng=es&tlng=es.
- Dash, P. (2005). Land surface temperature and emissivity retrieval from satellite measurements.
- Cevik Degerli, B., & Cetin, M. (2023). *Evaluation of UTFVI index effect on climate change in terms of urbanization*. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-8.
- De Manuel et al. (2021). A new indicator of the effectiveness of urban green infrastructure based on ecosystem services assessment. *Basic and Applied Ecology*, 53, 12-25.
- De Corso Sicilia, G. B., Rivera, M. P., & Navarro, J. G (2017). *Métodos gráficos de análisis exploratorio de datos espaciales con variables espacialmente distribuidas*. *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, 13(25), 92-104.

- Derkzen, M. L., van Teeffelen, A. J., & Verburg, P. H. (2015). *Quantifying urban ecosystem services based on high-resolution data of urban green space: an assessment for Rotterdam, the Netherlands*. *Journal of Applied Ecology*, 52(4), 1020-103
- Durán, D. (2010). *Las dimensiones de la sustentabilidad*. [En línea] Consultado el 16 de junio de 2021. Recuperado de: https://www.ecoport.al.net/temas-especiales/desarrollo-sustentable/las_dimensiones_de_la_sustentabilidad/
- Fischer, M. (2001). *Spatial Analysis in Geography*. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. Pp. 14752–14758.
- Fisher, M. (2023). *Environmental Biology*. Disponible en: [https://espanol.libretexts.org/Biologia/Ecolog%C3%ADa/Biolog%C3%ADa_Ambiental_\(Fisher\)/01%3A_Ciencias_Ambientales/1.01%3A_La_Tierra%2C_los_Humanos_y_el_Medio_Ambiente](https://espanol.libretexts.org/Biologia/Ecolog%C3%ADa/Biolog%C3%ADa_Ambiental_(Fisher)/01%3A_Ciencias_Ambientales/1.01%3A_La_Tierra%2C_los_Humanos_y_el_Medio_Ambiente) [Consultado el 25 de julio del 2023]
- Fuenzalida, M. (2015). *La perspectiva del análisis espacial en los Sistemas de Información Geográfica*. En Miraglia et. al. *Sistemas de Información Geográfica en la investigación científica actual*. (pp. 49-58)
- Gálvez, J. (2013). *Criterios para la Planificación y el Diseño de Corredores Fluviales Urbanos para la Mitigación de la Isla de Calor (Urban Heat Island)*. Granada, España: Foro sobre Desarrollo Territorial Sostenible.
- Gartland, L. (2008). *Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas*.
- Geng, X. et al. (2023). Impacts of climatic zones on urban heat island: Spatiotemporal variations, trends, and drivers in China from 2001–2020. *Sustainable Cities and Society*, 89, 104303.
- Gianuzzo, A. (2010). Los estudios sobre el ambiente y la ciencia ambiental. *Scientiae Studia* VIII (1): 129-156.
- Gligo, N. (2001). *La dimensión ambiental en el desarrollo de América Latina*. Cepal.
- Grandón, J. (2006). *Ética, política y poética: Hacia una lectura ecocrítica de Pablo Neruda*. *Revista de Crítica Literaria Latinoamericana*, 32(63/64), 253-263.
- Hakan, O. (2016). *Automated land surface temperature retrieval from landsat 8 satellite imagery: A case study of kahramanmaraş-turkey*. *Environmental Sustainability and Landscape Management*. 598.
- Hernández, A. (2009). *Calidad de vida y Medio Ambiente Urbano: indicadores locales de sostenibilidad y calidad de vida urbana*. *Revista invi*, 24(65), 79-111
- Hernández, J. (2020). *Áreas verdes, atmósfera urbana y calidad de vida. Una propuesta metodológica*.
- Inostroza, L., Garay, H. y Andrade, G. (2020). *Servicios ecosistémicos urbanos en Latinoamérica, oportunidades para el desarrollo urbano sostenible, la acción*

climática y la gestión de la biodiversidad urbana. Universidad de los Andes. Cr. 1 #18a-12. No.4

- Jáuregui, O. (1979). *La isla de calor en Toluca, Méx. Investigaciones geográficas*, (9), 27-37.
- Karimi, J. D., Corstanje, R., & Harris, J. A. (2021). Bundling ecosystem services at a high resolution in the UK: Trade-offs and synergies in urban landscapes. *Landscape Ecology*, 36(6), 1817-1835.
- Karlinasari, L., Pertiwi, S., & Erizal, E. (2023) Urban Heat Island Index Change Detection Based on Land Surface Temperature, Normalized Difference Vegetation Index, and Normalized Difference Built-Up Index: A Case Study. *Journal of Ecological Engineering*, 24(11).
- Larrouyet, M. C. (2015). *Desarrollo sustentable: origen, evolución y su implementación para el cuidado del planeta*.
- Mackenzie, D. y Susan, M. Ingeniería y Ciencias Ambientales. Editorial McGraw Hill. México. 2004.
- Marando, F., Salvatori, E., Sebastiani, A., Fusaro, L., & Manes, F. (2019). *Regulating ecosystem services and green infrastructure: assessment of urban heat island effect mitigation in the municipality of Rome, Italy*. *Ecological Modelling*, 392, 92-102.
- Martin, P., Baudouin, Y., & Gachon, P. (2015). An alternative method to characterize the surface urban heat island. *International journal of biometeorology*, 59, 849-861.
- Martínez, R. (2020). *Estimación de la temperatura superficial en imágenes históricas Landsat 5 mediante corrección atmosférica monocanal en el térmico para la cuenca del río Tempisque-Bebadero (Costa Rica)*. *Revista Geográfica de América Central*, (65), 17-32.
- Méndez, C. C. M., Uribe, D. M., & Becerril, L. A. G. (2007). *Isla de calor en Toluca, México*. CIENCIA ergo-sum, *Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 14(3), 307-316.
- Millennium Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being*. Synthesis. Island Press. Washington.
- Mokate, K. (2003). *“Convirtiendo el “monstruo” en aliado. La evaluación como herramienta de la gerencia social”*. Washington DC: BID- INDES.
- Naciones Unidas, (2015). *Convención Marco de Cambio Climático*. París: Conferencia de las Partes. Aprobación del Acuerdo de París. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/109s.pdd>

- Nasar-U-Minallah, et al. (2023). Ecological monitoring of urban thermal field variance index and determining the surface urban heat island effects in Lahore, Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(10), 1212-1212.
- Navarro-Díaz, M., Moreno-Fernández, O., & Rivero-García, A. (2020). El cambio climático en los libros de texto de educación secundaria obligatoria. *Revista mexicana de investigación educativa*, 25(87), 957-985.
- NU. Objetivos de desarrollo sostenible. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, (2021). Disponible en: <https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- UNFCCC. *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, (1992). Disponible en: https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/convsp.pdf
- Ortegon, E., Pacheco, J. y Prieto, A. (2015). *Metodología del marco lógico para la planificación, el seguimiento y la evaluación de proyectos y programas*. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5607/S057518_es.pdf
- Orhan, O., y Yakar, M. (2016). *Investigating land surface temperature changes using Landsat data in Konya, Turkey*. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, B8.
- Pacheco, G. A. B., & Hernández, R. (2019). Some climate-change aspects to be considered for the survival of living organisms: a systematic literature review. *Revista Cuidarte*, 10(3)
- PCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)].
- Ramyar, R. et al. (2020). *Ecosystem services mapping for green infrastructure planning—The case of Tehran*. *Science of the Total Environment*, 703, 135466.
- Rendón, G. (2010). *Espacios verdes públicos y calidad de vida*. In 6to. Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual, Mexicali, 5, 6 y 7 Octubre 2010. Centre de Política de Sòl i Valoracions.
- Ronco, N. R. (2019). *Cambios a escala micro-climática: Islas de calor urbanas*. Universidad Nacional de la Plata.
- Salinas, E. (1991). *Análisis y evaluación de los paisajes en la planificación regional en Cuba*. Tesis de doctorado, Universidad de la Habana, 187 pp.
- Salinas, E. (2005). *La geografía física y el ordenamiento territorial en Cuba*. *Gaceta ecológica*, (76), 35-51.

- Sarría, F. (2006). *Sistemas de información geográfica*. Universidad de Murcia, 239.
- Secretaría Distrital de Ambiente (2021). Planeación ambiental. Disponible en: <https://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/planeacion-ambiental>
- Shastri, H., & Ghosh, S. (2019). Urbanisation and surface urban heat island intensity (SUHII). *Climate Change Signals and Response: A Strategic Knowledge Compendium for India*, 73-90.
- Siddiqui, A. et al. (2021). Analysing the day/night seasonal and annual changes and trends in land surface temperature and surface urban heat island intensity (SUHII) for Indian cities. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103374.
- Singh, P. et al. (2023). *Evaluating the relationship between Urban Heat Island and temporal change in land use, NDVI and NDBI: a case study of Bhopal city, India*. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-12.
- Solutions, V. I. (2009). Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide. ENVI.
- Soto, E. (2019). *Estimación de la isla de calor urbana en Medellín, Colombia*. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(2), 421-434.
- Szumacher, I., y Malinowska, E. (2013). *Servicios ecosistémicos urbanos según el modelo de Varsovia*. *Revista del CESLA*, (16), 81-108
- Universidad de Murcia, (n.d.). *Fundamentos físicos de la teledetección*. <https://www.um.es/geograf/sig/teledet/fundamento.html>
- Vásquez, A. E. (2016). *Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile*. *Revista de Geografía Norte Grande*, (63), 63-86.
- Velandia, N. y Rojas, S. (2019). *Análisis multitemporal de la cobertura del bosque húmedo tropical en la Amazonía colombiana 2009-2018* (San Vicente del Caguán-Cartagena del Chairá, Caquetá).
- Vlassova, L., y Pérez Cabello, F. (2016). *Land Surface Temperature (LST) estimated from Landsat images: applications in burnt areas and tree-grass woodlands (dehesas)* (Doctoral dissertation, Universidad de Zaragoza, Prensas de la Universidad).
- Vlassova, L., Tufiño, P. R., & Llovería, R. M. (2016). *Variabilidad espacio-temporal de la temperatura de superficie en ecosistemas de dehesa estimada mediante imágenes Landsat TM: el papel del arbolado*. *Geographicalia*, (68), 69-86.
- Wanderley, L.N.R., Domingues, L. M., Joly, C. A., & da Rocha, R. H. (2019). *Relationship between land surface temperature and fraction of anthropized area in the Atlantic forest region, Brazil*. *PloS one*, 14(12), e0225443.

- Zarta, P. (2018). *La Sustentabilidad o Sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad*. Tabula Rasa, Núm. 28. Fecha de consulta: 22 de octubre de 2019. Disponible en: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/396/39656104017/html/index.htm>
- Niu, L., et al. (2019). *Application of the Data from Landsat8 OLI-The New Generation of Landsat Series in the Cultivated Land Information Extraction*. In *Computer and Computing Technologies in Agriculture X: 10th IFIP WG 5.14 International Conference, CCTA 2016, Dongying, China, October 19–21, 2016, Proceedings 10* (pp. 52-63). Springer International Publishing.
- Yadav, A., Kumar, R., & Swarup, S. (2023). *Remote Sensing Image-Based Analysis of the Urban Heat Island Effect in Relation to the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): A Case Study of Patna Municipal Corporation*. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11 (1).
- Yu et al. (2019). *Selection of landsat 8 OLI band combinations for land use and land cover classification*. In 2019 8th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics) (pp. 1-5). IEEE.
- Zhang, M. et al. (2023). *Assessing the impact of fractional vegetation cover on urban thermal environment: A case study of Hangzhou, China*. *Sustainable Cities and Society*, 96, 104663.
- Zheng, B., Chen, Y., & Hu, Y. (2022). *Analysis of land cover and SUHII pattern using local climate zone framework—A case study of Chang-Zhu-Tan main urban area*. *Urban Climate*, 43, 101153.

ANEXO FOTOGRÁFICO







































































