



Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Química

Facultad de Planeación Urbana y Regional

Facultad de Geografía

Facultad de Ingeniería

Facultad de Turismo y Gastronomía

EL METABOLISMO URBANO DE LA ZONA METROPOLITANA DE TOLUCA, MÉXICO

Tesis para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Elaboró: M. en C. Dainiz Noray Montoya García

Tutor Académico: Dr. Salvador Adame Martínez

Tutores Adjuntos: Dr. E. del G. Cadena Vargas

Dra. Verónica Martínez Miranda



Toluca, Estado de México, enero 2023



ÍNDICE

Resumen	09
Abstract	12
Introducción	15
Antecedentes	18
Planteamiento del Problema	20
Justificación del proyecto	23
Objetivos e hipótesis	25
Capítulo 1. Marco Teórico Conceptual	26
1.1 Conceptos básicos de termodinámica y complejidad	26
1.2 Sistemas abiertos en la naturaleza y como ciudad.....	30
1.2.1 Estudio termodinámico de las ciudades.....	39
1.2.2 La cultura y los efectos en los ecosistemas.....	43
1.3 El Metabolismo Urbano.....	48
Capítulo 2. Marco de referencia	54
2.1. Precursores y Estudios actuales del metabolismo urbano.....	55
2.2. Aportaciones del metabolismo urbano.....	59
2.3. Retos que afronta el estudio del metabolismo urbano.....	61
Capítulo 3. Historia de la Zona Metropolitana de Toluca -ZMT-	65
3.1. Contexto prehispánico del Valle Toluca.....	65
3.2. Conformación de la Zona Metropolitana de Toluca.....	67
3.3. Políticas de Planeación de la ZMT.....	72
3.4. Problemas sociales y ambientales que enfrenta la ZMT desde su configuración...	75



Capítulo 4. Metodología	78
4.1. Modelo y selección de la información.....	79
4.2. Cálculos para el análisis metabólico.....	83
4.3. Construcción de Índices Metabólicos.....	86
Capítulo 5. Metabolismo de la ZMT entre 2000 y 2017	88
5.1. Metabolismo hídrico de la ZMT.....	88
5.2. Metabolismo de consumo de electricidad.....	95
5.3. Metabolismo energético con base en consumo de combustible.....	102
5.4. Metabolismo por producción de alimentos y generación de Residuos Sólidos Urbanos.....	110
5.4.1. Generación de Residuos Sólidos Urbanos.....	116
5.5. Metabolismo de las Actividades económicas.....	120
5.6. Relación de las actividades económicas con el metabolismo urbano de la ZMT.....	126
5.6.1. Las actividades económicas y los RSU.....	126
5.6.2. Las actividades económicas y el consumo de agua.....	128
5.6.3. Las actividades económicas y la cantidad de vehículos.....	130
5.7. Índices Metabólicos de la ZMT.....	133
Capítulo 6. Potencial colapso de la ZMT	137
6.1. Señales de Colapso.....	137
6.2. La necesidad de un cambio.....	139
Conclusiones	143
Anexos	145
Bibliografía	168



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Leyes de la Termodinámica.....	28
Tabla 2. Comparativa entre un ecosistema y una ciudad.....	37
Tabla 3. Efectos de la entropía en los ecosistemas y las ciudades.....	38
Tabla 4. Definición de las leyes termodinámicas y su interpretación a las ciudades.....	39
Tabla 5. ¿Cómo van a interactuar la población y la economía mundiales en expansión con la capacidad de carga limitada de la tierra y adaptarse a ella en los próximos decenios?.....	46
Tabla 6. Aportaciones al estudio del metabolismo urbano.....	56
Tabla 7. Trabajos de metabolismo urbano para ciudades latinoamericanas.....	57
Tabla 8. Políticas, Planes y Leyes implementados para la conformación de la ZMT entre 1940 a 1990.....	68
Tabla 9. Problemas sociales y ambientales de la ZMT.....	76
Tabla 10. Formulaciones para determinar las entradas de la ZMT.....	83
Tabla 11. Formulaciones para determinar las dinámicas de la ZMT.....	84
Tabla 12. Formulaciones para determinar las salidas de la ZMT.....	85
Tabla 13. Semáforo de Índices Metabólicos.....	87
Tabla 14. Metabolismo hídrico de la ZMT entre 2000 y 2017.....	90
Tabla 15. Principales Contaminantes presentes en el agua del Río Lerma.....	94
Tabla 16. Metabolismo por consumo de electricidad de la ZMT.....	96
Tabla 17. Emisiones de CO ₂ -eq. por CTE de la ZMT.....	99
Tabla 18. Consumo Total de Combustible en la ZMT.....	103
Tabla 19. Movilidad de los habitantes de la ZMT.....	106
Tabla 20. Emisiones totales de CO ₂ eq por consumo de combustible.....	107
Tabla 21. Producción agrícola de la ZMT.....	111
Tabla 22. Agricultura de temporal y de riego en el Distrito de Toluca entre 2006 y 2020	112
Tabla 23. Cambio de uso de suelo de la ZMT entre 1984 y 2018.....	113
Tabla 24. Volumen de RSU vertidos en rellenos sanitarios en la ZMT.....	117



Tabla 25. Rellenos Sanitarios por municipio de la ZMT.....	118
Tabla 26. Variación del PBT en las distintas actividades económicas de la ZMT.....	121
Tabla 27. Número de viviendas en la ZMT entre 2000 y 2015.....	125
Tabla 28. Índices Metabólicos de la ZMT.....	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema termodinámico abierto.....	27
Figura 2. Diagrama de una máquina térmica.....	29
Figura 3. Bifurcaciones en el tiempo.....	30
Figura 4. Diagrama funcional de un ecosistema.....	32
Figura 5. Relaciones entre la naturaleza y las ciudades.....	35
Figura 6. Crecimiento de las ciudades a través del tiempo.....	36
Figura 7. Relación entre el daño ambiental y el consumo.....	45
Figura 8. La mal llamada “ <i>Curva de Kuznetz</i> ”.....	50
Figura 9. Flujos de energía y los flujos de la economía.....	51
Figura 10. Flujos metabólicos de una ciudad.....	53
Figura 11. Estudios Metabólicos en América Latina entre 2010 y 2018.....	59
Figura 12. Ubicación y conformación de la Zona Metropolitana de Toluca.....	71
Figura 13. Flujos metabólicos de la ZMT.....	81
Figura 14. Diagrama de elaboración del presente trabajo.....	82
Figura 15. Balance de agua de la ZMT (2000 y 2017)	89
Figura 16. Consumo de agua por municipio de la ZMT.....	91
Figura 17. Aguas residuales per cápita en la ZMT.....	92
Figura 18. Consumo per cápita de agua en algunos países contra la ZMT.....	93
Figura 19. Balance del Consumo Total de electricidad de la ZMT.....	96
Figura 20. Consumo Total de electricidad de la ZMT.....	97
Figura 21. Consumo per cápita de la electricidad de la ZMT.....	98



Figura 22. Emisiones totales de CO ₂ -eq. en la ZMT.....	100
Figura 23. Emisiones de CO ₂ -eq per cápita en la ZMT.....	101
Figura 24. Consumo de electricidad per cápita de la ZMT y otras regiones del mundo...	102
Figura 25. Balance del consumo del combustible en la ZMT.....	103
Figura 26. Consumo energético bruto por consumo de combustible en la ZMT.....	104
Figura 27. Consumo per cápita de los municipios de la ZMT.....	105
Figura 28. Emisiones totales de CO ₂ -eq per cápita por consumo de combustible.....	108
Figura 29. Emisiones de toneladas métricas de CO ₂ eq per cápita en algunas regiones y la ZMT.....	109
Figura 30. Producción de alimentos de la ZMT.....	111
Figura 31. Uso de suelo en la ZMT en 1984.....	114
Figura 32. Uso de suelo en la ZMT en 2018.....	114
Figura 33. Producción agrícola de algunos estados con la ZMT.....	116
Figura 34. Volumen de RSU vertidos en rellenos sanitarios por municipio.....	118
Figura 35. Producción de RSU per cápita de la ZMT y otras regiones del mundo.....	120
Figura 36. Evolución del PBT en la ZMT entre 2004 y 2018.....	121
Figura 37. Actividades económicas municipales en la ZMT.....	122
Figura 38. PBT del sector inmobiliario de la ZMT entre 2004 y 2018.....	124
Figura 39. Correlación del PBT Sec. y la generación de RSU.....	127
Figura 40. Correlación del PBT Ter. y la generación de RSU.....	127
Figura 41. Correlación del Número de viviendas y la generación de RSU.....	127
Figura 42. Correlación entre el PBT Sec y el consumo de agua.....	129
Figura 43. Correlación entre el PBT Ter. y el consumo de agua.....	129
Figura 44. Correlación entre el Número de viviendas y el consumo de agua.....	129
Figura 45. Correlación entre el PBT Sec con las aguas residuales.....	131
Figura 46. Correlación entre el PBT Ter con las aguas residuales.....	131
Figura 47. Correlación entre el número de viviendas con las aguas residuales.....	131
Figura 48. Correlación del PBT Sec con el número de vehículos.....	132
Figura 49. Correlación del PBT Ter con el número de vehículos.....	132
Figura 50. Correlación del número de viviendas y el número de vehículos.....	132



Figura 51. Índice Metabólico por ranking de la ZMT (2000).....	135
Figura 52. Índice Metabólico por ranking de la ZMT (2017).....	135

ANEXOS

Anexo 1. Balance de materiales.....	145
Anexo 2. Balance de energía.....	146
Anexo 3. Análisis por Componentes Principales.....	148
Anexo 4. Metabolismo hídrico por subcomponente (municipio) del Sistema ZMT.....	150
Anexo 5. Metabolismo del Consumo de Electricidad por subcomponente de la ZMT.....	151
Anexo 6. Consumos de agua per cápita en algunos países y la ZMT.....	152
Anexo 7. Consumos de electricidad per cápita en algunos países y la ZMT.....	152
Anexo 8. Metabolismo de consumo de combustible de Vehículos Particulares de la ZMT en el 2000.....	153
Anexo 9. Metabolismo de consumo de combustible de Vehículos Particulares de la ZMT en el 2019.....	154
Anexo 10. Metabolismo de consumo de combustible de Vehículos Públicos y de Carga de la ZMT en el 2000.....	155
Anexo 11. Metabolismo de consumo de combustible de Vehículos Públicos y de carga de la ZMT en el 2019.....	156
Anexo 12. Metabolismo por consumo de combustible total de la ZMT en el 2000.....	157
Anexo 13. Metabolismo por consumo de combustible total de la ZMT en el 2019.....	158
Anexo 14. Emisiones de CO ₂ eq per cápita en algunas regiones del mundo y la ZMT.....	159
Anexo 15. Producción agrícola de la ZMT.....	160
Anexo 16. Producción agrícola en algunas entidades federativas del país y la ZMT.....	161
Anexo 17. Volumen de RSU emitidos en la ZMT.....	162
Anexo 18. RSU generados per cápita en algunas regiones del mundo y la ZMT.....	163



DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Anexo 19. PBT en la ZMT.....	164
Anexo 20. PBT del Sector Inmobiliario de la ZMT.....	165
Anexo 21. Artículo enviado y aceptado en la Revista “Quivera” UAEMEX.....	166
Anexo 22. Artículo enviado y aceptado en al Revista “REVIDEC”.....	167



RESUMEN

A partir de la segunda mitad del siglo XX, en América Latina se impulsaron importantes proyectos y políticas con el fin de generar desarrollo y prosperidad a sus países a través de la industrialización, pero sin una planificación urbana eficiente, sin visión a largo plazo y sin considerar la localidad, por lo que se configuraron ciudades poco planificadas, con crecimientos desordenados, horizontales y con enormes consumos de materiales y energía. Como consecuencia, presentan en la actualidad, graves problemas ambientales (islas de calor, contingencias ambientales, contaminación de suelo y agua), sociales (violencia, falta de acceso a servicios básicos, desigualdad) y de infraestructura urbana (poca eficiencia en movilidad), lo que las hace altamente vulnerables ante cualquier contingencia.

Ante esta realidad no escapa la Zona Metropolitana de Toluca -ZMT-, localizada en la parte central de México y configurada por 15 municipios alrededor de la ciudad de Toluca, capital del Estado de México, desde 2015. Por ello, se llevó a cabo el estudio de su metabolismo urbano, con la finalidad de dar cuenta el estado que guarda dicha área y para que los datos obtenidos sean implementados en los futuros planes de urbanismo. Asimismo, se propuso la creación de Índices Metabólicos -IM- como una metodología de estandarización del metabolismo urbano para poder comparar diversas ciudades en estudios futuros.

Para ello, la ZMT fue considerada como un sistema termodinámico abierto que intercambia constantemente con el entorno, materiales, energía e información. Se empleó la metodología de Análisis de Flujo de Materiales y Energía (MEFA, por sus siglas en inglés) entre los años 2000 y 2017; tomando como entradas al sistema, indicadores de consumo de electricidad, de agua y combustible; como sus dinámicas: el parque vehicular, la producción de alimentos, el PBT de los sectores secundario y terciario; y como salidas: las emisiones de CO₂-eq provenientes de la generación de electricidad y la quema de combustibles, el volumen de aguas residuales y de residuos sólidos urbanos. Mientras que



IM fueron determinados través del Análisis de Componentes Principales (ACP) y se calcularon por cada municipio de la ZMT para compararlos entre ellos.

Se encontró en el periodo de estudio: 1) un incremento en el consumo de electricidad se elevó en los municipios periféricos (de 8.9 PJ a 12.4 PJ) al ser sitios “dormitorio”, implicando con ello, emisiones indirectas (por la quema de carbón para su generación) de CO₂-eq (1,508,280,226 Ton/año a 1,585,531,880 Ton/año); 2) altos consumos de combustibles (de 4.75 PJ a 10.89 PJ) que se deben al costo de traslado de los habitantes de los municipios periféricos a la centralidad a sus destinos de trabajo o actividades, lo que provoca problemas de movilidad en la zona y un crecimiento en las emisiones de CO₂-eq. (523,848 Ton/año a 2,023,311 Ton /año); 3) un aumento en el consumo de agua (de 140.19hm³/año a 229.86 hm³/año) que evidencia una crisis en su disponibilidad, además del abatimiento de diversas áreas de la ZMT y la alta dependencia al Sistema Cutzamala; 4) un crecimiento en la cantidad de RSU generados (547,610 ton/año a 560, 000 ton/año), que son muestra de la concepción de consumismo imperante en los habitantes de la zona por el desecho de materiales de un solo uso.

Por otro lado, la disminución en el suelo agrícola (908.8 miles de hectáreas a 882.2 hectáreas) se debe primordialmente a la sustitución por zonas habitacionales, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria de la ZMT; mientras que el decremento en el volumen de agua residual (132 hm³/año a 99.4 hm³/año) señala la existencia de una clandestinidad en su vertido en cuerpos de agua superficiales y en la filtración en los pozos de abastecimiento, por lo que es un problema grave de planeación y desarrollo urbano.

Por su parte, a través de los IM se encontró una inequidad en el acceso y consumo de recursos, que el crecimiento urbano se orienta hacia el sureste de la centralidad, aunado a que los municipios localizados al noroeste de ésta privilegian el suelo agrícola a pesar de la urbanización evidente.

Concluyendo entonces que la insustentabilidad de la ZMT y la inviabilidad del modelo de vida dominante, la pone en riesgo de colapsos termodinámicos parciales ambientales,



económicos y sociales. Por ello, resulta imperante que las políticas actuales sean replanteadas a partir de estudios metabólicos, desde la termodinámica, la economía ecológica y la entropía, para buscar un sistema metabólico circular, que permita una mayor resiliencia y sustentabilidad urbana.



ABSTRACT

Since the second half of the 20th century, important projects and policies have been promoted in Latin America in order to generate development and prosperity in their countries through industrialization, but without efficient urban planning, without a long-term vision and without considering the locality, which resulted in poorly planned cities, with disorderly, horizontal growth and enormous consumption of materials and energy. As a result, they currently present serious environmental problems (heat islands, environmental contingencies, soil and water contamination), social problems (violence, lack of access to basic services, inequality) and urban infrastructure problems (low efficiency in mobility), which makes them highly vulnerable to any contingency.

The Toluca Metropolitan Zone -ZMT-, located in the central part of Mexico and made up of 15 municipalities around the city of Toluca, capital of the State of Mexico, is no exception to this reality since 2015. Therefore, a study of its urban metabolism was carried out, in order to account for the state of the area with the purpose of implementing this data in future urban planning. Likewise, the creation of Metabolic Indexes -IM- was proposed as a standardization methodology to be able to compare the urban metabolism of cities in future studies.

For this purpose, the ZMT was considered as an open thermodynamic system that constantly exchanges materials, energy and information with the environment. The Materials and Energy Flow Analysis (MEFA) methodology was used between the years 2000 and 2017; taking as inputs to the system, indicators of electricity, water and fuel consumption; as its dynamics: the vehicle fleet, food production, the PBT of the secondary and tertiary sectors; and as outputs: CO₂-eq emissions from electricity generation and fuel burning, the volume of wastewater and urban solid waste. While MI were determined through Principal Component Analysis (PCA). They were calculated for each municipality of the ZMT and compared between them.



It was found that in the study period: 1) the increase in electricity consumption rose in the peripheral municipalities (from 8.9 PJ to 12.4 PJ) as they are "dormitory" sites, thus implying indirect emissions (by burning coal for its generation) of CO₂-eq (1,508,280,226 tons/year to 1,585,531,880 tons/year); 2) the high fuel consumption (from 4.75 PJ to 10.89 PJ) is due to the cost of transporting the inhabitants of the municipalities outside the central area to their work or activity destinations, which causes mobility problems in the area and an increase in the cost of transporting the inhabitants of the municipalities outside the central area to their work or activity destinations, causing mobility problems in the area and a growth in the consumption of electricity. (7.5 PJ to 10.89 PJ) are due to the cost of transportation of the inhabitants of the municipalities outside the centrality to their work or activity destinations, which causes mobility problems in the area and a growth in CO₂-eq emissions. (523,848 tons/year to 2,023,311 tons/year); 3) the increase in water consumption (from 140.19 hm³/year to 229.86 hm³/year) shows a crisis in its availability, in addition to the depletion of several areas of the ZMT and the high dependence on the Cutzamala System; 4) the increase in the amount of MSW generated (547,610 tons/year to 560,000 tons/year) is evidence of the prevailing concept of consumerism among the inhabitants of the area due to the disposal of single-use materials.

On the other hand, the decrease in agricultural land (908.8 thousand hectares to 882.2 hectares) is primarily due to the replacement by residential areas, putting at risk the food security of the ZMT; while the decrease in the volume of wastewater (132 hm³/year to 99.4 hm³/year) indicates the existence of clandestine dumping in surface water bodies and filtration in supply wells, which is a serious problem of urban planning and development.

In the mean time, through the MI it was found that there is inequity in the access and consumption of resources, that urban growth is oriented towards the southeast of the city center, and that the municipalities located to the northwest of the city center favor agricultural land in spite of the evident urbanization.



In conclusion, the unsustainability of the ZMT and the unfeasibility of the dominant model of life put it at risk of partial environmental, economic and social thermodynamic collapse. Therefore, it is imperative that current policies be rethought based on metabolic studies, from thermodynamics, ecological economics and entropy, in order to seek a circular metabolic system that allows for greater resilience and urban sustainability.



INTRODUCCIÓN

Las ciudades son constructos antrópicos altamente interdependientes con el medio circundante, a través de flujos de materia, energía e información, por lo que, a lo largo de la historia y los avances tecnológicos han determinado estas relaciones y con ello, la complejidad urbana.

Entre los siglos XVIII y XIX, con la invención de la máquina de vapor (1765) y la Revolución Industrial (1760-1840) se dio un punto de inflexión para la conformación y el funcionamiento de las ciudades, pues al promover la industrialización; consecuentemente, se requirió de mayor cantidad de recursos para la expansión urbana, lo que hasta el día de hoy tiene repercusiones. La extracción de materiales se incrementó en un 800% (entre 1900 y 2005), la población mundial pasó de 1,575 millones de personas en 1900 a 6,137 millones en 2001 y las urbes son responsables del 76% del consumo de la energía mundial, lo que afecta irreversiblemente al planeta comprometiendo sus límites biofísicos (Crutzen, 2002; Krausmann *et al.*, 2009; IPCC, 2014). Esto trajo consigo, a partir de la segunda mitad del siglo XX, el crecimiento urbano, sobre todo en el hemisferio sur sea acelerado, horizontal, disperso, lo que conlleva al deterioro de la calidad de vida de los habitantes urbanos y de los ecosistemas locales (Delgado *et al.*, 2012).

Ante esto, surgió la necesidad de cuantificar y analizar los flujos de materiales y energía urbanos a través de lo denominado metabolismo urbano¹ (Wolman, 1965), que, desde la termodinámica, considera a una ciudad como una máquina térmica, es decir, un sistema abierto que intercambia materiales, energía e información con sus alrededores, al tiempo que es altamente complejo por sus dinámicas e interacciones de los actores sociales. No obstante, esta perspectiva es incipiente en los planes de urbanismo, sobre todo en los países en vías de desarrollo, pues están sustentados en enfoques mecanicistas, reduccionistas y

¹ El metabolismo urbano se considera como la suma de todos los procesos socioeconómicos que ocurren dentro de las ciudades, lo que da pie a su crecimiento, producción y desecho de materiales y energía (Kennedy *et al.* 2007)



causales predominantes durante el siglo XIX, lo que ha impedido un cambio sustancial en el diseño urbano para mitigar, erradicar o prevenir los actuales problemas urbanos.

Resulta imperante entonces, la necesidad de implementar planes urbanos que contemplen la complejidad, el metabolismo urbano y las Leyes de la Termodinámica para gestionar la entropía urbana y se busquen modelos semejantes a la naturaleza, esto es, la gestión circular de sus recursos. En América Latina, los primeros trabajos de metabolismo urbano empezaron en 2010, destacando las investigaciones de: González y Schandl (2008), Díaz (2011), Luna (2015), Jaramillo (2017) y Rosales (2018). Sin embargo, se limitan a únicamente el conteo de flujos de materiales y los investigadores se enfrentan a poca o dispersa disponibilidad en la información, a asimetría en ella y a limitantes burocráticas, lo que ha provocado que, en algunos casos, los estudios sean meramente comparativos. Además, existe un atraso importante con respecto a trabajo de Europa, Asia y América del Norte, pues en estas regiones, el estudio metabólico es indispensable para la planeación urbana. Asimismo,

En este tenor, el presente trabajo busca aportar al estudio metabólico en México, empleando como caso de estudio a la Zona Metropolitana de Toluca -ZMT-, localizada en la parte central de este país. Su conformación comenzó desde 1940 cuando se determinó que la capital del Estado de México, Toluca, fuera una ciudad industrial (Montoya, 1995). Esto trajo consigo cambios drásticos en el uso de suelo, en los recursos naturales y en los actores sociales. Hasta 2015 quedó conformada por 16 municipios, lo que la hace un área cada vez más compleja al presentar problemas de movilidad por las largas distancias para el desplazamiento de sus habitantes, por la alta contaminación atmosférica, hídrica y de suelos, por la desigualdad en el acceso a servicios básicos como la electricidad y el agua potable, por los crecientes niveles de inseguridad y violencia, entre otros; haciendo que sea una zona cada vez más vulnerable a colapsos parciales o incluso total.

Es por esta problemática que se determinó analizar el metabolismo urbano de esta zona metropolitana, a través del Análisis de Flujo de Materiales y Energía (MEFA por sus siglas en inglés); al tiempo que se propuso la creación de Índices Metabólicos a través de análisis



estadísticos con el propósito no sólo de comparar el metabolismo de los municipios que componen a la ZMT, sino porque no hay una metodología estandarizada para comparar ciudades entre sí.

Los resultados evidenciaron que la ZMT tiene un problema sistémico, es insustentable y termodinámicamente ineficiente, donde su estructura, configuración y funcionamiento se sostiene, por un lado, en políticas provenientes del exterior y en planes de urbanismo obsoletos que datan del siglo XIX y sometidos a la lógica crematística, que omiten la complejidad del área de estudio; y, por otro lado, por la falta de visión a largo plazo por parte de los gobiernos locales, lo que implica un retroceso en cada gestión, por lo que los estudios metabólicos y su importancia no están contemplados en la lógica gubernamental.

Ante esto, es urgente la necesidad de involucrar este tipo de trabajos científicos en la planeación urbana de la ZMT, cuya evidencia muestra que la calidad de vida de sus habitantes disminuye, asimismo, un cambio de visión para que la gestión de la entropía y de los recursos sean más eficientes a través de flujos circulares, o su vulnerabilidad se afianzará al paso del tiempo.



ANTECEDENTES

Históricamente, el concepto de metabolismo fue establecido por Carlos Marx en 1883, en su obra “El capital”, al señalar que las sociedades, en su afán de industrializarse, requerían de intercambios de materiales y energía con la naturaleza (Díaz y Silva, 2015). En 1965, Abel Wolman (1965), estableció el primer estudio de metabolismo urbano al considerar desde una perspectiva ingenieril, el perfil de flujos de materiales en una ciudad hipotética junto con sus afectaciones hacia el medio circundante (Zhang, 2019).

Esta perspectiva, sustentada en estudios de ecología, biología y en la termodinámica, hace posible entender a las urbes como ecosistemas y máquinas térmicas que intercambian constantemente información, energía y materiales con su entorno (Broto *et al.*, 2012). A partir de esto, comenzaron estudios metabólicos utilizando tecnologías computacionales para el mejor procesamiento de los datos y la posibilidad de hacer mejores modelos matemáticos (Céspedes y Morales, 2018). Algunos estudios importantes, destacan los hechos a ciudades como: Sydney (Newman, 1999), Viena (Hendricks *et al.*, 2000), Londres (White, 2003), Ningbo en China (Zhang *et al.*, 2006), Paris (Barles, 2009). En el caso de Latinoamérica, los estudios son más recientes, sobresaliendo el estudio de Díaz (2016) sobre Bogotá, y de Guibrinet *et al.* (2016) sobre las ciudades de México y Santiago.

En los países del alto desarrollo como China, Canadá, la Unión Europea, Japón o Estados Unidos, los estudios metabólicos son indispensables para el desarrollo de políticas públicas, la planeación urbana y para diseñar medidas de gestión de materiales, lo que hace que sus ciudades sean más resilientes. Mientras que los estudios metabólicos en América Latina son incipientes, con diversos problemas en la obtención de información, en la minería de datos y en los especialistas para llevarlos a cabo, lo que dificulta que sean considerados dentro la planeación urbana local.



Por ello, resulta urgente que se comience a llevar a cabo este tipo de estudios en América Latina, desde la perspectiva de su complejidad y atendiendo las Leyes de la Conservación de la Masa y Energía (Díaz, 2014) y las Leyes de la Termodinámica (Bostanci, 2019), con la finalidad de buscar la eficiencia de los flujos metabólicos, gestionar la entropía urbana, disminuir la vulnerabilidad urbana y hacer a las ciudades más sustentables y resilientes.

El caso de estudio para este trabajo, la Zona Metropolitana de Toluca, cuya conformación data de la década de 1940, sufrió afectaciones en su vocación agrícola, en la pérdida de zonas hídricas (ciénegas, arroyos, ríos) para iniciar su industrialización. Dicho proceso fue sometido a la lógica crematística, por lo que careció de una planeación urbana eficiente, con visión a largo plazo, haciendo que dicha área urbana sea insustentable y altamente vulnerable. De ahí la obligación de llevar a cabo su estudio metabólico, para que sean considerado dentro su planeación urbana local y ejercer acciones que mitiguen su entropía.



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

“La ciudad es el mayor escenario de transformación del espacio y vivencial en el que se desenvuelve el ser humano; es el lugar en el que la persona puede “ser o estar”, debido a que la estructura y configuración de la ciudad satisface las necesidades sociales, fisiológicas, de seguridad, de autoestima y autorrealización...” (Ayala, 2017). Esta promesa, junto con el crecimiento industrial y económico han hecho, que las ciudades concentren alrededor del 54.5% de la población mundial, correspondiente a 4,142 millones de 7,600 millones de personas (ONU, 2016).

Como consecuencia, es necesario suministrar más recursos (agua, combustibles, alimentos, electricidad) para brindar más servicios (seguridad, educación, salud, transportes eficientes) con el fin de solventar las necesidades de la población, lo que genera una enorme presión sobre el ambiente circundante de las ciudades a escala local, regional o global, provocando una alta degradación ecológica y graves problemas sociales.

Por señalar algunos datos: entre 1900 y 2009 el consumo de materiales ha alcanzado alrededor de 7Gt (miles de millones de toneladas) hasta alcanzar las 70 Gt, de los que destacan: la biomasa pasó de 5 Gt a 20 Gt, los combustibles fósiles de 1 Gt a 13 Gt, los metales de 0.2 Gt a 6 GT y los minerales de construcción de 0.7 Gt a 28 Gt (Infante, 2014). Mientras que las estimaciones de consumo de energía se han incrementado hasta alcanzar 15 Terawatts (10^{12} watts) por año hasta el 2008 (Castro, 2011). El aumento en el volumen de residuos sólidos urbanos ha crecido por la generación de productos de un solo uso. Por ejemplo, en América Latina, la tasa por habitante al día es 0.5 a 1 kg/habitante-día, mientras que en países industrializados es de 1 a 2 kg/habitante-día (Sáez *et al.*, 2014). La extracción de agua dulce se ha incrementado alrededor de 1% anual desde los años 80, debido a la creciente demanda en los países en desarrollo (WWAP, 2016). Las ciudades son responsables del 70% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2015).



Y, finalmente el 70% de la población latinoamericana vive en áreas urbanas y el 27% de sus habitantes están en condiciones de alta marginación (Delgado, 2015b).

Esta problemática genera una alta degradación de los entornos urbanos y sus alrededores, generando problemas sociales como la inseguridad, la desigualdad y la incapacidad de los sectores más vulnerables a los servicios básicos; y consecuencias ambientales como la contaminación de suelo, agua y aire.

La Zona Metropolitana de Toluca (ZMT) no escapa a esta realidad. Presenta, al igual que otras mega urbes latinoamericanas, un patrón de crecimiento acelerado, planificada con propósitos industriales (Montoya, 1995), es poco ordenada que se ve reflejado en problemas de movilidad (Centro Mario Molina, 2014) y en deterioro de infraestructuras (Hinojosa, 2017); muestra pérdidas de zonas arbóreas y cambio de uso de suelo agrícola (Versañez, 2014) con fines habitacionales principalmente. Como resultado, sufre con problemas ambientales: cuerpos de agua contaminados (Carreño *et al.*, 2018), altos niveles de contaminación atmosférica (Ballesteros y Rotter, 2014), grandes cantidades de generación de residuos sólidos (Rodríguez y Montesillo 2017), ruido (Azpeitia *et al.*, 2016), islas de calor (Morales *et al.*, 2007) y que es semillero de conflictos sociales (García *et al.*, 2015)

Por tanto, el problema central actual de las ciudades radica en la planeación urbana deficiente y en la gestión de la entropía (Díaz, 2018). El sistema de planeación de México lamentablemente no considera estos aspectos como factores críticos del bienestar, pues entre los tres niveles de gobierno “*existen interferencias, incoherencias y contradicciones en políticas acentuadas por la desarticulación de competencias administrativas, cuya operatividad y vigencia está determinada por distintos ordenamientos jurídicos federales, estatales y municipales*” (Vilchis *et al.*, 2018).

Además, el concepto de planeación urbana tradicional ya es obsoleto, porque no contempla la complejidad y la no linealidad del sistema urbano; por lo que el análisis metabólico de las ciudades se convierte en indispensable para replantear el concepto de urbanismo no



desde la perspectiva clásica de la economía dominante, sino desde una visión mucha más integradora, que tome en cuenta los límites biofísicos de la región, que promueva la real democracia participativa de los actores sociales, y que contemple la gestión de la entropía, a través de modelar rutas más eficientes en el uso de recursos y gestión de residuos.



JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La planeación urbana actual en los países en vías de desarrollo se considera obsoleta (Boccolini, 2017). En el caso mexicano, diversos estudios muestran que el proceso de planificación urbana y el manejo de la demografía fueron interrumpidos en los años treinta para dar paso a un proceso intensivo de industrialización, lo que estimuló a una desordenada concentración de la población en zonas específicas del territorio nacional (Gutiérrez, 2009).

Además, la planeación urbana mexicana se caracteriza por estar sustentada en marcos teóricos y metodológicos mecanicistas, con visiones físicas totalizantes, que omiten la complejidad urbana y que ha admitido pocas aportaciones científicas. En el caso concreto del Estado de México, hasta el año 2000 los Planes de Desarrollo Urbano se sustentaban en la “Guía para la elaboración del Plan de Centro de Población” de los años sesenta, mientras que, en la actualidad, los planes municipales y el estatal de desarrollo urbano presentan pocas mejoras al elaborarse bajo estos mismos formatos anticuados (Gutiérrez, 2014).

Esto evidencia que, bajo esta planificación arcaica, el crecimiento y desarrollo, se ha conformado una Zona Metropolitana de Toluca insustentable. Por ello, las actuales políticas actuales de la ZMT deben ser cuestionadas sobre sus fundamentos teóricos y la forma en que se aplican en la realidad. Es entonces que se abre una oportunidad de replantear su organización desde las nuevas perspectivas del urbanismo, que contemplen que las ciudades deban ser estudiadas y planeadas desde su propia evolución compleja.

Puesto que las urbes son sistemas abiertos, dinámicos e irreversibles en el tiempo, la termodinámica puede ser útil para comprender dicha complejidad, a través del conocimiento de los flujos metabólicos y de la gestión de la entropía (Díaz, 2018). De tal forma que, el punto de partida cualquier proyecto de planeación urbana debe ser el estudio del metabolismo de las ciudades. Éste constituye se en *“un concepto útil, flexible*



reconocido ampliamente por la academia, la industria, la sociedad y algunos gobiernos que ayudan al entendimiento de las ciudades y sus dinámicas” (Díaz, 2014). Estos análisis permiten el conocimiento de los consumos de energía y materia que las ciudades emplean en su supervivencia, por ende, pueden ser ajustados a los límites biofísicos del lugar e implantar una nueva reingeniería de consumos y finalmente, la gestión de entropía.

Los estudios metabólicos de ciudades de primer mundo son ampliamente usados en proyectos de política urbana de sus países. Es por ello, que la hacer estudios metabólicos en ciudades latinoamericanas se presenta la oportunidad de que las políticas actuales de urbanismo y planificación los utilicen con la finalidad de mejorar la calidad de vida de sus habitantes y del entorno; se pueda garantizar una mayor sustentabilidad y una menos vulnerabilidad entrópica de las urbes.



OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivos de la investigación

General:

Analizar el metabolismo energético y de materiales de la Zona Metropolitana de Toluca en el periodo comprendido entre 2000 y 2017, bajo las Leyes de la Termodinámica y el Principio de Conservación de Materia y Energía para dar cuenta de la magnitud de sus consumos y con ello plantear alternativas dirigidas a la sostenibilidad.

Particulares:

1. Elaborar el Marco de Referencia sobre trabajos relacionados con la ecología, la termodinámica y el metabolismo urbano.
2. Determinar el metabolismo urbano de la Zona Metropolitana de Toluca en el periodo comprendido entre 2000 y 2017 empleando el Principio de la Conservación de la Materia y Energía.
3. Dar evidencia de la situación metabólica de Zona Metropolitana de Toluca en el periodo de estudio.
4. Establecer una propuesta metodológica para la medición del metabolismo urbano de cada municipio, y que sirva de base para futuros estudios.

Hipótesis:

Mediante el estudio del metabolismo urbano de la Zona Metropolitana de Toluca bajo las leyes de la termodinámica, se podrá establecer estrategias para la sostenibilidad en dicha área.



CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

Desde la termodinámica, las ciudades son sistemas abiertos que se comportan como máquinas térmicas, pero además son comparadas con los ecosistemas, pues sus dinámicas de consumo de materiales y energía, su transformación, y salidas en forma de desechos (metabolismo) han hecho que, en la mayoría de los casos crezcan y se mantengan en el tiempo.

En este capítulo se explica esto, a través de sus fundamentos teóricos, estos conceptos, que dan pie a la comprensión de las ciudades y sus dinámicas que en esta era del Antropoceno, que por las acciones humanas se está gestando un colapso urbano y planetario.

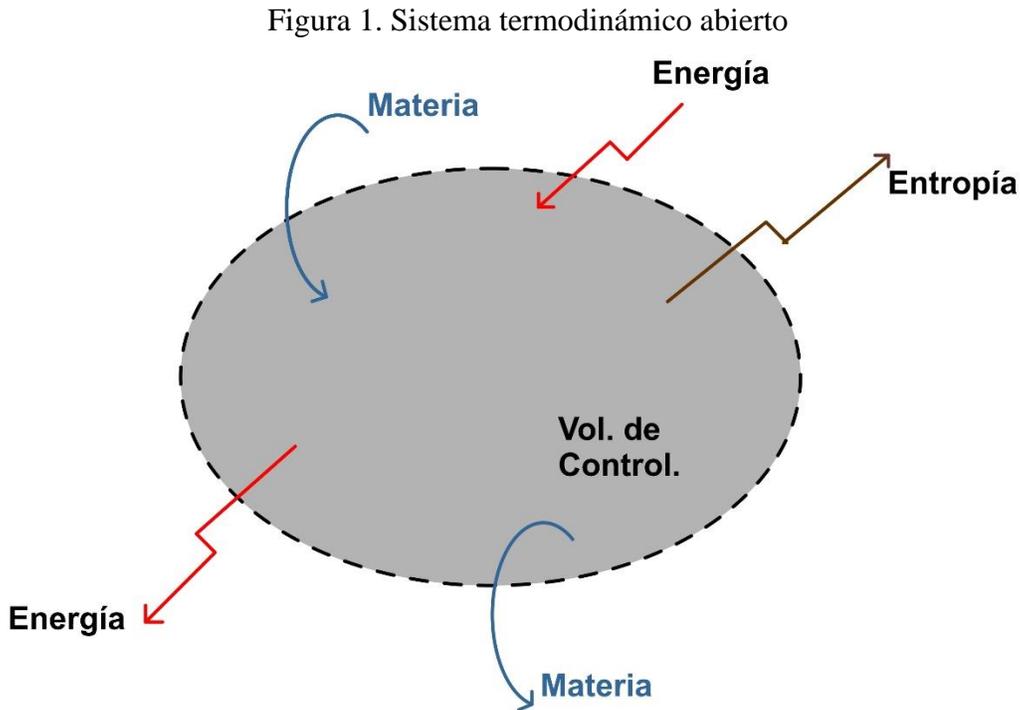
1.1 Conceptos básicos de Termodinámica y Complejidad

“La termodinámica es una disciplina que nos provee de un marco teórico general para analizar y comprender de manera sistemática y rigurosa el intercambio de masa, energía y entropía entre sistemas termodinámicos” (Santamaría, 2014; 11). En este sentido, el sistema termodinámico se considera como una *“una determinada cantidad de materia o un cierto volumen en el espacio, la cual se desea estudiar... Es una región configurada en el espacio y de la que se desean estudiar las transformaciones de energía [y de materia] que ocurren dentro de sus límites”* (Faires y Simmang, 2002).

Para este trabajo, es de interés los sistemas abiertos, lo cuales intercambian energía, materia y entropía con su entorno, lo que se llama proceso (Santamaría, 2014; Smith, *et al.*, 2003,



Figura 1), alterando así, sus propiedades². Y es precisamente estos cambios de estado ocurridos en el tiempo, el objeto de estudio del no equilibrio³; para lo cual es necesario el entendimiento de las Leyes de la Termodinámica (Tabla 1).



Fuente: Elaboración propia del autor con base en Santamaría (2014)

Ahora bien, al hablar de las Leyes de la Termodinámica, una de las propiedades más importantes dentro de su estudio es la **entropía**. Es una propiedad extensiva⁴ de un sistema en un estado dado (Cengel y Boles, 2014; Smith *et al.*, 2003), a la que se le considera como: la calidad de energía que se emite al ambiente después de haber realizado un trabajo (Cengel y Boles, 2014); y la expresión de la irreversibilidad de algunos de los procesos termodinámicos en el tiempo (Prigogine, 1996).

² Las propiedades termodinámicas expresan el comportamiento o condición (estado) de un sistema cuando son modificadas; entre ellas se encuentran: la masa, energía (E), la Presión (P), temperatura (T), densidad (ρ), entropía (S), volumen específico (Faires y Simmang, 2002), entre otras.

³ "La termodinámica de no equilibrio estudia los procesos de transferencia de masa, energía y entropía en los sistemas macroscópicos cuando éstos tienen lugar por medio de procesos irreversibles" (Santamaría, 2014; 14).

⁴ Una propiedad extensiva es aquella que depende de la cantidad de materia que contenga el sistema.



Tabla 1. Leyes de la Termodinámica

Principio termodinámico	Principio termodinámico
Ley Cero. “Si dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí”. (Cengel y Boles 2012, 17)	Primera ley. “Cuando un sistema pasa por un cambio cíclico, el calor neto que entra o sale del sistema es igual al trabajo neto que efectúa o admite el mismo” (Faires 2002, 80)
Segunda ley. “Ninguna máquina termodinámica real o ideal que opera en ciclos puede convertir en trabajo todo el calor suministrado a la sustancia operante, sino que tiene que ceder una cierta cantidad de este calor” (Faires 2002, 108).	Tercera ley. “La entropía absoluta es cero para todas las sustancias cristalinas perfectas a la temperatura de cero absoluto” (Smith et al. 2003, 200).

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

En el primer sentido, la calidad de la energía se expresa al considerar a las máquinas térmicas (Figura 2); cuyo funcionamiento se da a partir del suministro de energía a alta temperatura, la generación de trabajo y el desecho de energía a temperatura más baja a un sumidero (Smith *et al.*, 2003); cuya eficiencia se determina por la calidad de la energía suministrada con el trabajo realizado, esto es: cuando la energía térmica esté a mayor temperatura será de mayor calidad y realizará más trabajo (Cengel y Boles, 2014).

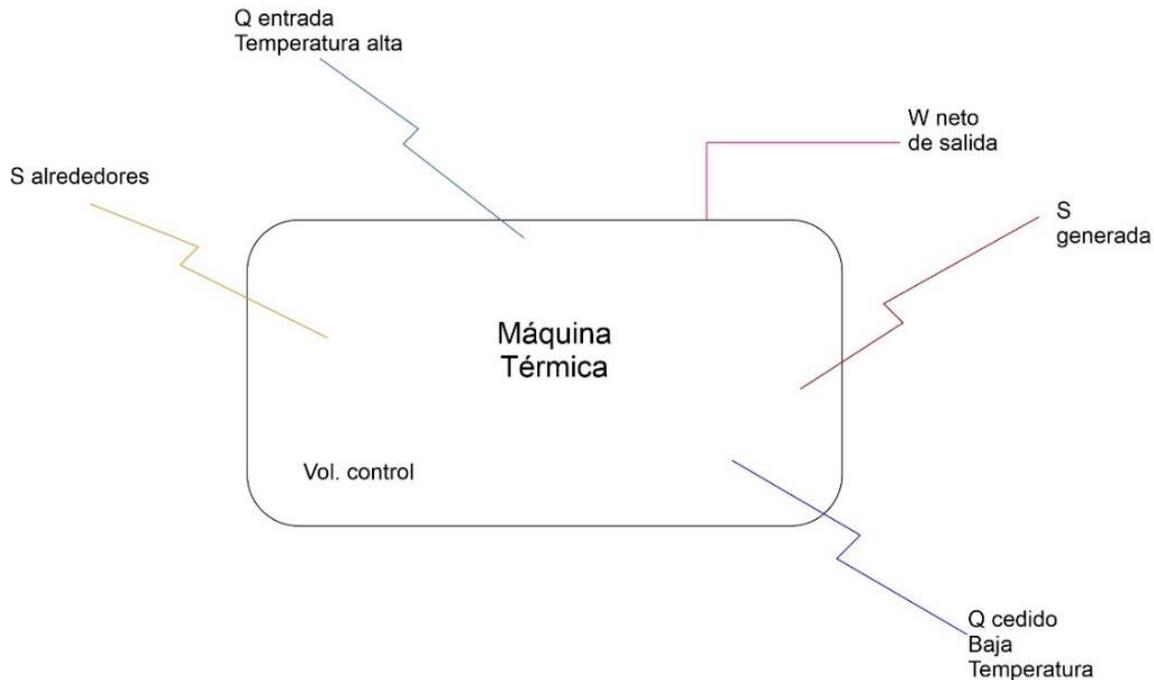
Empero, de acuerdo con la Segunda Ley, a partir de la energía proveída en una máquina térmica, una parte se empleó para la realización del trabajo, y otra, es disipada o cedida al ambiente, cuya calidad es menor porque tiene una temperatura inferior que a la de entrada, por tanto, pierde utilidad para realizar nuevamente un trabajo y no es posible recuperarla. En este sentido, la entropía señala la calidad de esa energía saliente⁵.

Por ende, la eficiencia de una máquina térmica y siempre será menor a 100%. Se sabe, por ejemplo, que en un automóvil a gasolina oscila entre el 20%, y uno a diesel va entre el 35 al 40% (Cengel y Boles, 2014).

⁵ Esta es la postura desde la termodinámica clásica. Candel *et al.*, (1984) que el aumento de la entropía está asociado con la degradación de la energía.



Figura 2. Diagrama de una máquina térmica



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

En cuanto a la irreversibilidad⁶, la entropía es útil para saber si “*contribuye a algún papel constructivo en la evolución de los fenómenos*” (Maldonado, 2011). En este tenor, todos los sistemas abiertos coexisten con sus alrededores interactuando de forma directa o indirecta, a lo que cualquier cambio producido en el exterior o hacia éste lo afectará en sus propiedades, flujos, dinámicas e información generando inhomogeneidades e inestabilidad (Prigogine, 1996) en el tiempo.

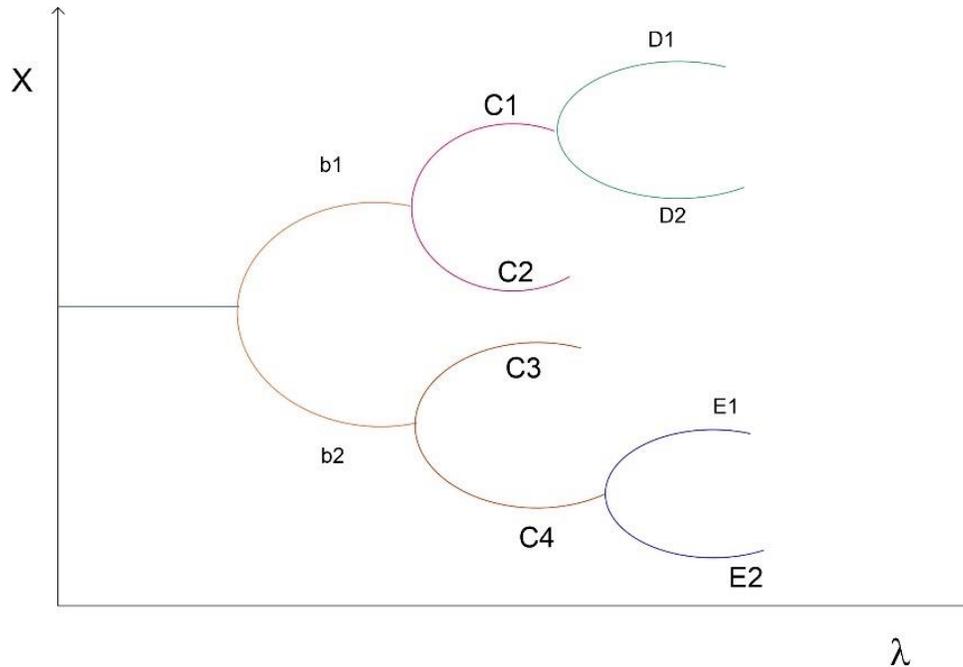
Como consecuencia, estas bifurcaciones (Figura 3) originan una constante disipación de materia y energía (Carpintero, 2006) es decir, entropía, y con ello, nuevas trayectorias que son imposibles de predecir, a lo que el sistema nunca regresará a su estado original (irreversibilidad); constituyendo una nueva estructura, orden, flujos y complejidad (Tyrtania, 2008); siendo esto, la expresión máxima de la evolución y de la no linealidad (Maldonado, 2011)

⁶ En los sistemas aislados o cerrados (ideales) se considera que generan procesos reversibles o estables, es decir que su entropía es cero, por ello, no son de interés para este trabajo.



Estos cambios son estudiados dentro de la termodinámica no atomista se expresan en aspectos fenomenológicos, físicos, orgánicos y sociales simultáneos, que ocurren de maneras variadas, discontinuas y azarasas; en un determinado tiempo y espacio (Tyrtania, 2008).

Figura 3. Bifurcaciones en el tiempo



Fuente: Elaboración propia del autor con base en Prigogine (1996)

1.2. Sistemas abiertos en la naturaleza y como ciudad

“El organismo vivo es mantenido en continuo intercambio de componentes; el metabolismo es una característica básica de los sistemas vivientes. Estamos, como si dijéramos, ante una máquina compuesta de combustible que continuamente se consume y, sin embargo, aquella se preserva” (Von Bertalanffy, 1968). Bajo esta premisa, las ciudades se comportan como organismos vivos que se sustentan a partir del ambiente que los rodean,



transforman la energía y materia recibidas y las excretan al exterior; lo mismo sucede con los ecosistemas. Por ello, el estudio urbano se sustenta en esta analogía, y es imperante comprender su funcionamiento.

De acuerdo con Odum (1971) un ecosistema es una *“unidad que incluye todos los organismos en un área determinada que interactúan con el ambiente físico, y por lo tanto el flujo de energía define de manera clara la estructura trófica, la diversidad biótica y los ciclos de materiales dentro del sistema o el ecosistema”*.

Mientras que Abler *et al.*, (1972) definen a la ciudad como *“una organización de personas y actividades especializadas diseñadas para maximizar los intercambios [económicos, materiales y energéticos]; a nivel local, la ciudad es el menor medio de interacción de actividades sociales y económicas para máximo beneficio de todas ellas; a nivel regional, aparecen sistemas de ciudades para organizar intercambio entre lugares distantes y para facilitar, a las áreas circundantes de carácter no urbano, los bienes y servicios que necesitan”*.

Por tanto, desde la termodinámica los ecosistemas y las ciudades son sistemas abiertos, cuyo entendimiento está relacionado con las fluctuaciones externas e internas de energía y materiales, que dan pie a su organización, la estructura, evolución y grado de concentración de información siguiendo la flecha del tiempo.

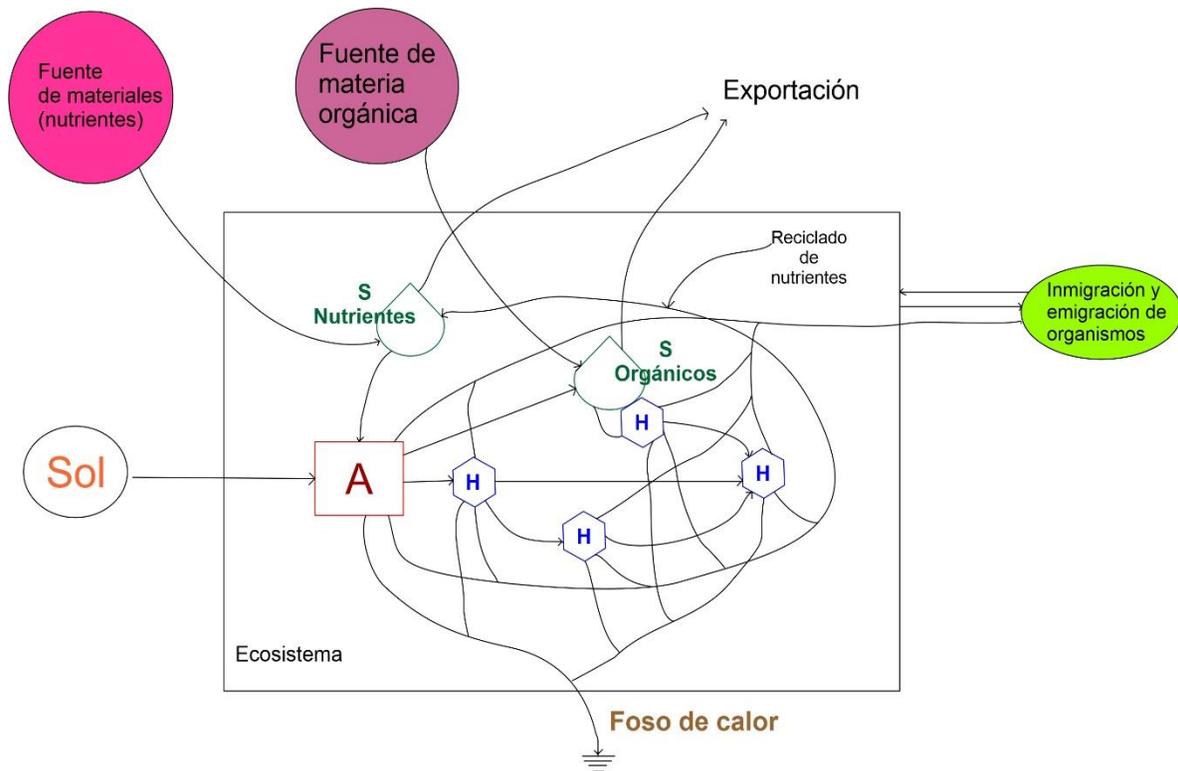
En el caso de los ecosistemas, su conformación y estructuras actuales son el resultado de un proceso evolutivo de alrededor de 500 millones de años (Oparin, 2008) lo que los hacen altamente eficientes en el uso y transformación de energía y materiales. A través de subsistemas y procesos internos como la fotosíntesis, la herbivoría, la depredación, el parasitismo, etc. y otras actividades simbióticas (Evans, 1956), ha sido posible llevar a cabo todas las actividades necesarias para mantener la vida en la Pachamama.

En el caso de la energía, los ecosistemas la obtienen de forma bruta en su mayoría del Sol, aunque también pueden ser fuentes como el viento, la lluvia, entre otras; y donde la energía



fluye de tres maneras: en la primera, la comunidad (organismos, por ejemplo, Autótrofos, A) a través de subprocesos muy concretos como la fotosíntesis, la transforma e incrementa su calidad (por ejemplo, en materia orgánica, sustancias inorgánicas para los ciclos biogeoquímicos, información) que será utilizada por los organismos Heterótrofos (H); la segunda, donde la energía puede ser almacenada (S) y/o exportada pero no reutilizada; y la tercera, la mayoría de la energía entrante se degrada y no puede ser utilizada por lo que sale en forma de calor en los diferentes fosos o sumideros (Higueras, 2009; Odum y Barret, 2008), cumpliendo en su conjunto con las Leyes de la Termodinámica (Figura 4).

Figura 4. Diagrama funcional de un ecosistema



Fuente: Odum y Barret (2008)

En cambio, la materia (orgánica e inorgánica) se emplea una y otra vez, siendo eficientemente reciclada en los diferentes ciclos biogeoquímicos y cadenas tróficas, de cada ecosistema. Es así como todo el balance general de energía y materia de un ecosistema en su conjunto se define en la ecuación 1 (Odum y Barret 2008):



$$Ecosistema = AE + S + AS \quad (\text{Ecuación 1})$$

Siendo:

AE = el sistema de entradas

AS = el sistema de salidas

S = límites del sistema⁷.

Ahora bien, los estudios de los ecosistemas han permitido comprender las leyes de cómo la energía fluye en ellos, y que en cada nivel disminuye en cantidad, pero aumenta en calidad lo que hace que sean sistemas autoorganizados (Odum, 1988) y autopoieticos⁸. En este sentido, esto se debe también a que los ecosistemas poseen redes de información que incluyen flujos de comunicación física y química que han servidos como reguladores, los cuales tienen mecanismos concretos de control (homeostasis) que permiten adaptarse a los cambios y mantener su equilibrio (siempre y cuando las condiciones lo permitan). Asimismo, la homeorresis permite hacer los cambios necesarios entre los ciclos energéticos y de materiales, a través de subsistemas por ejemplo de microbios que regular el almacenamiento y liberación de nutrientes, o el control de población entre otras acciones, (Odum y Barret, 2008) para mantener su estabilidad en el tiempo.

Del mismo modo, la evolución entre los flujos de energía y materia que han ido conformando los ecosistemas y la vida a lo largo de la historia de la vida en el planeta, ha permitido que la información también sea expresada en los genes, lo ha distinguido el orden de los seres vivos en los niveles tróficos y dando características propias al ecosistema Margalef (1991). Esta información genética (expresión de entropía) es fundamental, pues es la que ha permitido la evolución misma expresada en la diversidad, así como los comportamientos y funciones que todos los seres vivos tienen dentro de los ecosistemas.

⁷ Los límites de un ecosistema no son fijos, pues dependen de: 1) el tamaño del sistema, 2) la intensidad metabólica (a mayor tasa metabólica, mayor es el sistema), 3) el equilibrio entre autótrofos y heterótrofos y 4) el desarrollo del ecosistema (tiempo de evolución) (Odum y Barret, 2008)

⁸ Autopoiesis: proceso de un sistema de producir sus propios componentes.



En contraste, las ciudades son máquinas de origen antrópico que llevan alrededor de 10,000 de antigüedad (Vera, 2009), por tanto, por su organización cuyos flujos y procesos son lineales que no logran convertir la entropía en información útil, pues el uso de la energía y materiales entrantes es altamente ineficiente, porque no consiguen degradarlos e incorporarlos nuevamente al medio circundante (como sucede en la naturaleza), cuya expresión son desechos y altas cantidades de calor disipado (Fariña y Ruíz, 2002).

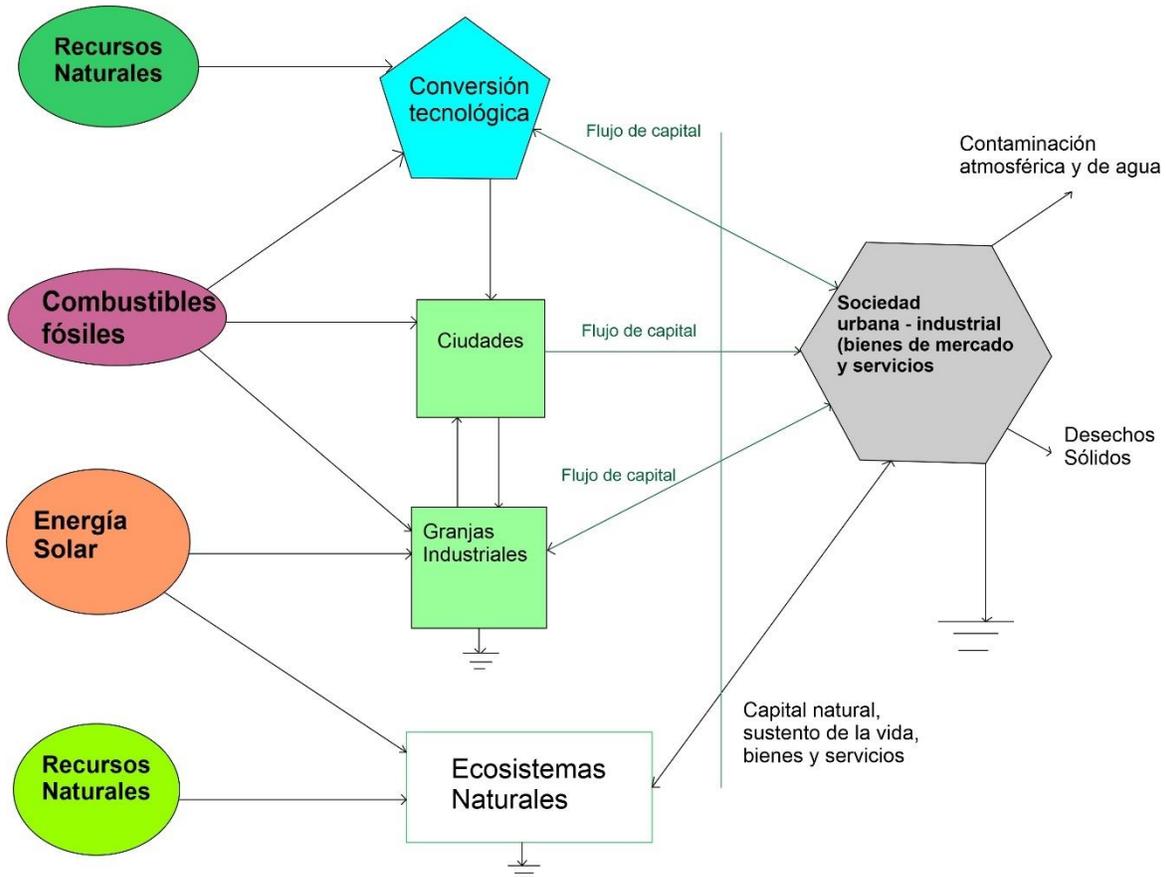
En el camino de la historia humana, en los primeros asentamientos urbanos, los seres humanos dependían completamente de la energía del sol (Díaz, 2014), por tanto, sus actividades como la agricultura estaban limitadas por la eficiencia en la captación de ésta, por tanto, la entropía generada no afectada a los alrededores (Odum y Barret, 2008).

Sin embargo, con la llegada de la Revolución Industrial, la energía proveniente del sol empezó a ser desplazada por energía almacenada en los recursos naturales (combustibles fósiles), lo que aceleró la disipación de energía, acompañada de una aceleración en las transformaciones sociales y urbana, y en el consumo energético (Rueda, 1997). Asimismo, se incorporó dentro de los flujos de materiales al capital, considerado como un flujo entre la sociedad urbana y los sistemas naturales, pero que son incompatibles con la naturaleza (Figura 5), lo que incrementa enormemente la ineficiencia pues nunca se podrá comprar y pagar por los llamados servicios ecológicos (Odum y Barret, 2008).

Ahora bien, gracias a los avances tecnológicos y la capacidad del ser humano de dominar la naturaleza, las ciudades han crecido de tal suerte que ha tenido un impacto directo sobre los ecosistemas circundantes (Figura 6), pues involucra un mayor consumo de recursos energéticos y materiales; haciendo que el sistema urbano sea cada vez más vulnerable a las perturbaciones externas.



Figura 5. Relaciones entre la naturaleza y las ciudades



Fuente: Odum y Barret (2008)

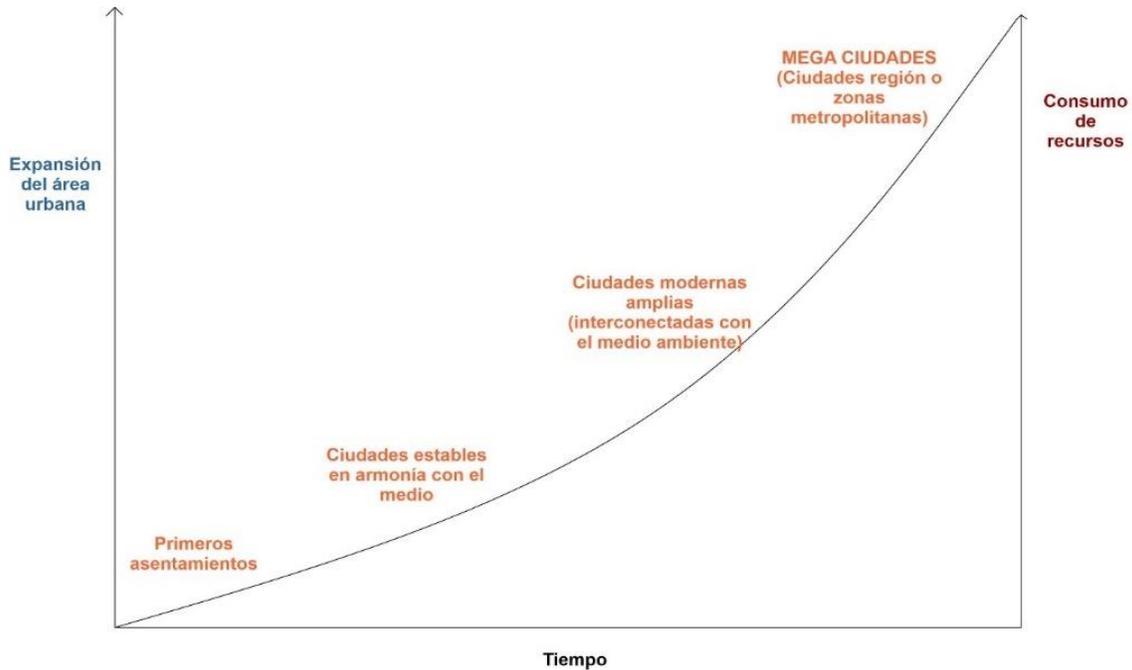
En este sentido una ciudad debe tratar de mantener una pseudo estabilidad a través de tratar de controlar los flujos de materia en su uso, transferencia y transformación; el manejo de la energía y la información provenientes de su interior emitida al exterior; la capacidad de regular su homeostasis y de resiliencia ante cambios sobre todo repentinos, teniendo en cuenta como el sistema evoluciona; y la disipación de entropía (Díaz, 2020).

Sin embargo, ante la evidente y agresiva apropiación del territorio, la ineficiencia termodinámica urbana, al igual que las modificaciones que las ciudades ejercen sobre los ecosistemas, los niveles de entropía disipada se han reflejado en los altos niveles de contaminación, problemas sociales y el cambio climático, que aumentan la probabilidad de que la ocurrencia de cambios ante los cuales los habitantes y las autoridades de las ciudades no están preparados. Dichas situaciones se han presentado con anterioridad a lo largo de la



historia, tal es el caso de Rapa Nui en la Isla de Pascua, ciudades Mayas, Harappa en el Valle del Indo y Angkor hoy Camboya, que ante cambios drásticos impulsados por incrementos poblacionales, aunado con una complejidad que ya no puede ser gestionada, llevó al colapso de dichos asentamientos (Dimond, 2006).

Figura 6. Crecimiento de las ciudades a través del tiempo



Fuente: Elaboración propia del autor con base en Díaz (2014).

Es por ello, que en la línea irreversible del tiempo las ciudades están en desventaja en su funcionamiento como sistema abierto termodinámico con los ecosistemas, porque las sociedades han incrementado la energía exosomática (la que requieren del exterior, de la naturaleza) sobre la endosomática (la necesaria para su metabolismo interno, González y Toledo, 2011), lo que las indica que han pasado de ser estructuras pseudosostenibles a áreas altamente interconectadas pero vulnerables. Esto se ha exacerbado a partir de la segunda mitad del siglo XX fomentado principalmente el sistema de consumo irracional de consumo, que a su vez influye en la cultura y comportamiento de las poblaciones.



Ante lo señalado, termodinámicamente los ecosistemas y los constructos humanos guardan diferencias, pero también algunas similitudes (Tabla 2). Por ello, su estudio y comprensión puede ser una herramienta que ayude a las sociedades a que su comportamiento sea semejante a la de la naturaleza.

Tabla 2. Comparativa entre un ecosistema y una ciudad

	Ecosistema	Ciudad
Obtención de materiales	Ciclos Biogeoquímicos	Explotación de recursos del medio circundante. Actividades económicas primarias y secundarias Niveles económicos de producción de bienes.
Acumulación de materiales	Ciclos biogeoquímicos	Almacenes Hogares Centros comerciales
Consumo de materiales	Población	La población a través de todas las actividades económicas (Primarias, Secundarias y Terciarias)
Desechos de materiales	Heces, Animales muertos que se reintegran a los ciclos biogeoquímicos. *Reservorios energéticos para consumo humano	Residuos sólidos urbanos. Búsqueda de reciclaje y reuso
Obtención de energía	Fuente primaria: SOL Fotosíntesis	Centrales eléctricas, eólicas y solares. Explotación de recursos minerales y fósiles
Acumulación de energía	En los diferentes niveles de las cadenas tróficas	Baterías, Combustibles, Centrales eléctricas.
Consumo de energía	A través de las cadenas tróficas. *Reservorios energéticos para consumo humano	Quema de combustibles fósiles y minerales. Utilización de medios eólicos y solares.
Desechos de energía	No existe Toda la degradación de energía se utiliza	Disipación de calor. Contaminación ambiental, islas de calor, contaminación térmica en reservorios de agua.

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: *Al hablar de reservorios de materiales es referenciado a que dentro de los ecosistemas se generan todos los productos (minerales, alimentos, materiales) y energía (generalmente potencial, en agua, minerales; y cinética, por ejemplo, la eólica) que el hombre utiliza para su transformación.

Una de las cuestiones centrales que guardan en común los ecosistemas y las urbes, ambas al ser sistemas abiertos es la forma en que gestionan la entropía disipada. De acuerdo con Von Bertalanffy (1968) los seres vivos mantienen un estado de alto orden que evolucionan hacia la organización diferenciada y diversa, que se debe a la expansión entrópica de Prigogine⁹ (Tabla 3) por lo que los seres vivos son “*sistemas de baja entropía y alta organización*” (Fariña y Ruíz, 2002). Cosa contraria a los constructos humanos como las ciudades que son de alta entropía y baja organización.

⁹ $dS = d_eS + d_iS$ siendo d_eS el cambio de entropía de importación, mientras que d_iS la producción de entropía del sistema. Ésta última siempre es positiva, mientras que d_eS puede ser negativo o positivo, que al ser negativo se dice que es energía libre o “entropía negativa”. Esta es la ecuación que explica la eficiencia de los sistemas vivos.



Tabla 3. Efectos de la entropía en los ecosistemas y las ciudades

Ecosistemas /Organismos	Ciudades
<p>De acuerdo con Margalef (1995):</p> <ul style="list-style-type: none">• La entropía condiciona el periodo de vida de un ecosistema, el planeta y el universo mismo.• La entropía contribuye a la heterogeneidad, que se actualiza con el constante “trabajo” de la máquina ecosistémica.• “El truco para aumentar la organización propia consiste en hacerse el centro el escenario de un proceso irreversible, importar material “más ordenado” y expulsando “menos ordenado”, y aprovechar la diferencia entre las ordenaciones respectivas de entrada y salida para conseguir algún trabajo como una máquina de vapor... para aumentar su riqueza estructural”. (Margalef, 1995),• Es así como “de lo que un organismo se alimenta es de entropía negativa” (Schrödinger, 1944), es decir, de la entropía (información, alimentos, nutrientes) proveniente de otro organismo.• Una parte del ecosistema “que se renueva más rápidamente [en éste] sustenta las estructuras próximas que tienen una tasa de renovación más baja” (Margalef, 1995)• La continuidad de los organismos vivos o ecosistemas no está en dejar más descendientes, sino en mantener la mayor información efectiva posible en el tiempo, ello equivale a una menor producción de entropía, esto es, procrear pocos descendientes.• Todos sus flujos son circulares, regresan al ciclo.	<ul style="list-style-type: none">• Las ciudades se alimentan de los ecosistemas (Parada, 2020), es decir, de recursos naturales.• En el caso de las ciudades, con la perspectiva cultural actual, no hay heterogeneidad, sino tiende a la homogeneidad, que se expresa en la infraestructura, y en el estilo de vida sustentado en el consumo.• Las ciudades presentan las siguientes características: 1) el volumen de energía exosómica que utiliza para funcionar, 2) que este flujo (y los otros) son horizontales y cada vez más, provienen de lugares más alejados (Rueda, 1997); 3) el consumo de los recursos está en función de la cultura.• El flujo de energía que las ciudades requieren es proporcional al gradiente de organización de éstas con la naturaleza (Rueda, 1997). Es decir, mientras más desorganizada una ciudad, más energía requerirá.• Se rigen al igual que los ecosistemas por el principio de Prigogine, por lo que mientras más entropía interna genere, más buscará disiparla al exterior y menor organizada está.• Las ciudades también se dirigen desde el centro, que es de donde se determina lo que sucederá en las periferias (Rueda, 1997). Actualmente están condicionados por el modelo económico actual, que ha hecho que sea poco eficiente termodinámicamente.• Los sistemas antropogénicos se caracterizan por ser lineales, lo que da un indicativo cuantificable de ineficiencia (Filchakova <i>et al.</i>, 2011)

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Por tanto, el problema central de las ciudades radica en que la entropía sea convertida o empleada como información útil, situación que aún está lejos de suceder. Siendo que, la entropía generada dentro de la urbe es mayor que la recibida del exterior, como la ecuación de Prigogine indicando entonces, que no hay una gestión de la entropía. Consecuentemente, esto se expresa a través problemas ambientales y sociales: pérdida de la calidad del aire, contaminación de suelos y agua, pérdida de biodiversidad, incremento de los residuos sólidos urbanos, pérdida de suelos forestales, altos problemas de movilidad interna, pérdida de la calidad de infraestructura, degradación del acceso a servicios básicos como la salud, seguridad, educación, entre otros (Díaz, 2018).



1.2.1 Estudio termodinámico de las ciudades

Las ciudades son sistemas abiertos, que se comportan análogamente como una máquina térmica. Por ende, el análisis de su funcionamiento debe cimentarse en el conocimiento sus fronteras urbanas, la forma de consumo, transformación y disipación de energía, información y materiales; el comportamiento de los flujos internos entre los diferentes actores urbanos; considerando, además que son sistemas termodinámicos alejados del equilibrio (Díaz, 2014).

Por esta razón, las ciudades están regidas las leyes de la termodinámica (Tabla 4) desde las cuales es posible establecer mecanismos para mejorar su eficiencia energética, su estructura termodinámica, su metabolismo urbano y su diseño y planificación en función de una baja entropía (Bostanci, 2019).

Tabla 4. Definición de las leyes termodinámicas y su interpretación a las ciudades

Principio termodinámico	Interpretación para la ciudad	Ejemplo
Ley Cero. “Si dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí”. (Cengel y Boles, 2012)	Ley cero. Las ciudades siempre tenderán a estar en equilibrio con sus alrededores.	Si una ciudad tiene ciertas condiciones, las ciudades aledañas buscarán estar en las mismas condiciones.
Primera ley. “Cuando un sistema pasa por un cambio cíclico, el calor neto que entra o sale del sistema es igual al trabajo neto que efectúa o admite el mismo” (Faires, 2002)	Primera Ley. “En los procesos urbanos el calor neto liberado es proporcional al trabajo neto realizado para su mantenimiento y crecimiento” (Díaz, 2018).	Todas las actividades que se realizan en una ciudad requieren energía y, por tanto, generan un trabajo y desprenden calor y materia. Esto puede originar, por ejemplo, islas de calor (Díaz, 2018).
Segunda ley. “Ninguna máquina termodinámica real o ideal que opera en ciclos puede convertir en trabajo todo el calor suministrado a la sustancia operante, sino que tiene que ceder una cierta cantidad de este calor” (Faires, 2002).	Segunda Ley. Cualquier actividad (trabajo) que realice la ciudad o se realice dentro de ella, siempre emitirá energía o calor no aprovechable al entorno, por lo que “en esa transformación [a la entropía], la energía pierde su calidad y se degrada, disminuyendo la posibilidad para el aprovechamiento humano” (Carpintero, 2006).	Algunas manifestaciones de energía no aprovechada en las ciudades son el ruido, los gases de combustión, todo el calor disipado.
Tercera ley. “La entropía absoluta es cero para todas las sustancias cristalinas perfectas a la temperatura de cero absoluto” Smith et al., 2003).	Tercera Ley. La entropía en las ciudades tiende a disminuir cuando sus temperaturas también lo hagan.	Termodinámicamente, una ciudad es menos entrópica en la estación invernal. Sin embargo, esto no se cumple en todas las ciudades. Tal es el caso de Toluca, donde los niveles de contaminación son muy altos.



Cuarta Ley*: “ <i>La materia disponible se degrada de forma continua e irreversiblemente en materia no disponible</i> ” (Georgescu-Roegen, 1971)	En las ciudades se emplean materiales que se van degradando en el proceso de su uso, que, al paso del tiempo, ya no se podrán utilizar.	La gran cantidad de desechos sólidos que las ciudades generan, infraestructura de mala calidad, productos que no es posible su reutilización como algunos tipos de plásticos, y la cultura de la obsolescencia programada. El reciclaje total no existe.
---	---	--

Fuente: Elaboración propia del autor con base en Díaz (2018).

* La Cuarta Ley no proviene de los estudios de la termodinámica clásica sino de las aportaciones que Nicholas Georgescu-Roegen, quien determinó que, en los procesos económicos de las sociedades modernas, también hay entropía.

La Ley Cero expresa que la energía se transfiere de un sistema a otro hasta alcanzar el equilibrio. En el caso de las ciudades, y con esta ley y la Primera de la Termodinámica el calor generado a partir de la radiación solar, las estufas, automóviles, cualquier tipo de energía química, eléctrica, etc., buscará disiparse con la finalidad de alcanzar el equilibrio térmico con sus alrededores. Por mencionar algunos ejemplos, el primero, es la calidad de los materiales utilizados en la construcción de las casas habitación, que, en el caso de México, absorben calor en temporada de calor, haciendo que la habitabilidad sea complicada y a su vez, promueve el consumo de energía para enfriar el lugar; y en temporada invernal las casas con muy frías, generando también el uso de calentadores. Esto afecta directamente al calor disipado por las ciudades. Mientras que otro ejemplo son las inversiones térmicas que, aunque son generadas por la combustión, producen un aumento de la temperatura urbana, y altos niveles de contaminación.

En lo referente a la Segunda Ley, ésta señala que es posible determinar a través de la eficiencia y autoorganización de las máquinas térmicas urbanas y ecosistemas (Bristow y Kennedy, 2013). Sin embargo, es imperante señalar que ningún sistema alcanza un 100% en la utilización de energía (es decir eficiencia del 100%), debido a que el trabajo obtenido es igual a la diferencia entre el calor suministrado (a alta temperatura) y el calor cedido al sumidero¹⁰ (a menor temperatura), al mismo tiempo que si no sucede esto, el ciclo natural no podría llevarse a cabo (Cengel y Boles, 2014).

En este sentido, como ya se mencionó anteriormente, un sistema natural disipa calor, pero tiene una estructura compleja y densa, resultado de un proceso de evolución donde se han

¹⁰ $W_{neto,salida} = Q_{entrada} - Q_{salida}$ (Cengel y Boles, 2014)



generado estructuras cíclicas, lo que ha hecho que posea una mayor capacidad de utilizar a la energía con mayor eficiencia, y con ello, también en el uso, transformación y desecho de materiales (Min Tan *et al.*, 2019). Caso contrario, los sistemas antrópicos son altamente ineficientes en el uso de sus recursos, debido a su estructura y funcionamiento, lo que lleva a los problemas ya mencionados.

Ahora, bien, al tomar en cuenta a la entropía (S), ambos tipos de máquinas (ciudades y ecosistemas), se someten a la ley natural produciéndola y siempre en aumento, esto explicado a través de la ecuación de Prigogine ($dS \geq 0$). En este sentido, la eficacia en el uso de la energía se expresa en la menor disipación posible de entropía ($d_i S$). En este tenor la eficiencia de cualquier sistema es menor al 50% (Cengel y Boles, 2014) y el de una urbe, oscila en el 40% (Díaz, 2018).

Además, para este trabajo, la entropía es considerada como una propiedad extensiva¹¹ por lo que mientras mayor sea el crecimiento y expansión de la máquina urbana, será más *energuívora* y más desordenada expresándose en todas manifestaciones de deterioro, contaminación dentro de la ciudad y en los ecosistemas circundantes. Es, por tanto, que el reto de la sustentabilidad urbana radica en minimizar la generación de entropía y gestionarla, pues de esta manera, garantizará su permanencia¹² (Rueda, 2013) o ampliar su vida útil, tomando en cuenta la organización social, así como la complejidad histórica, cultural y la cosmogonía de los habitantes urbanos.

Por otro lado, la Tercera Ley hace referencia que, a menor temperatura, mayor estabilidad tendrá los sistemas. Esto caracteriza a las ciudades que se ubican principalmente en Europa Estados Unidos y Canadá, en donde en invierno, tienden a tener más orden (Díaz, 2018), esto es, por las bajas temperaturas, el movimiento molecular es menor y consecuentemente, hay menos generación de entropía. Sin embargo, las ciudades horizontales, que se

¹¹ A mayor materia, mayor entropía y viceversa.

¹² La eficiencia urbana radica en que la organización de las ciudades se mantiene, y en algún momento podría hacerse más compleja, pero sin el aumento de consumo de recursos (Rueda, 2013).

$$e = \frac{E}{nH}$$

donde: E es la cantidad de recursos consumidos; n es el número de personas jurídicas (actividades económicas, instituciones) y H es el valor de la diversidad jurídica (lo que se conoce como complejidad o información organizada)



caracterizan por sustituir sus zonas arbóreas por infraestructura, tenderán a ser más desordenas porque acumularán calor.

En este sentido, la ciudad de Toluca se caracterizaba por tener temperaturas medias en temporada de frío inferiores a los 18°C y superiores a los -3°C (García, 1987). Sin embargo, la actividad antrópica ha modificado este comportamiento, siendo algunos de los factores más importantes el crecimiento poblacional, aunado que, al ser fin de año, las actividades económicas y la movilidad por las fechas decembrinas se incrementan considerablemente. Es por ello, que la temperatura en este periodo ha aumentado por los menos 2°C (Pérez *et al.*, 2010; Primo, 2015; Vilchis y Garrocho, 2018), acompañado de niveles de contaminación ambiental (sobre todo del 24 al 26 de diciembre y del 30 diciembre al 01 enero) dentro del rango de “Extremadamente alta”¹³. Por tanto, la estabilidad térmica y entrópica de esta ciudad y probablemente de otras más, se rompe por la acción humana.

Finalmente, la Cuarta Ley, propuesta del economista Nicholas Georgescu-Roegen, deja entre ver que, en un planeta de recursos finitos, con una explotación irracional o infinita, provocará que los recursos se agoten y no tengan posibilidad de recirculación, reutilización o reciclaje. Degradación y agotamiento que invariablemente genera entropía en procesos irreversibles (Carpintero, 2006)¹⁴.

En este tenor, se ha visto que en el mundo y con ello en las ciudades, la gestión de residuos es un problema global, porque es fácil producir materiales a partir de los recursos naturales, pero al ser procesados con sustancias químicas, es casi imposible que se vuelvan a incorporar a los ciclos biogeoquímicos. Por ello, en 2018 se generaron alrededor de 2010 millones de toneladas de residuos, de los cuales al menos el 33% se desechan directamente a vertederos. Asimismo, el Banco Mundial, sostiene que, con la rápida urbanización, el crecimiento poblacional y la búsqueda del desarrollo bajo la perspectiva del capitalismo, la

¹³ Estos datos pueden ser revisados en la página de la RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO AMBIENTAL DEL VALLE DE TOLUCA del Gobierno del Estado de México.

¹⁴ Esta ley es analogía de la segunda



cantidad de desechos se incrementará en un 70% en los próximos 30 años, llegando a un promedio de 3400 millones de toneladas anuales (Kaza *et al.*, 2018). Esto lleva a ocupar territorios para acumular los desechos, la contaminación de suelos, agua, aire y el agotamiento mismo de los recursos que impacta no sólo a la flora y fauna de un ecosistema, sino al propio ser humano.

1.2.2. La cultura y los efectos en los ecosistemas

Todo constructo humano en cualesquiera las condiciones de su existencia, sus características, el momento histórico en que se desarrollan, la complejidad de su organización, tienen una relación estrecha con la naturaleza. Es por esta influencia que existen diferentes culturas y cosmovisiones que han determinado la diversidad de las sociedades.

Es decir, las colectividades humanas a través del uso y transformación de recursos tomados de la naturaleza, se establece una relación metabólica, que en palabras de González y Toledo (2011): *“se consuman dos actos: por un lado, “socializan” fracciones o partes de la naturaleza, por el otro, “naturalizan” a la sociedad a producir y reproducir sus vínculos con la naturaleza”*. Esto es, la sociedad se configura a través de lo que toma de la pacha mama, al mismo tiempo dicha estructura transforma y condiciona a los ecosistemas circundantes.

Es entonces que la cultura forma parte de la cosmovisión, de las ideas, y creencias que permiten las relaciones humanas a través de las reglas, normas, códigos morales y que determina la operación de todos los procesos internos de una ciudad (Toledo, 2013). Asimismo, de acuerdo con Niklas Luhmann (1998), la cultura da un sentido de autorreferencia al sistema (sociedad) pues a través de la autorreferenciación, éste tendrá la posibilidad de delimitar sus fronteras, determinar qué es lo que está permitido entrar y que



no. A través de esto, se dice que una sociedad es un sistema autopoietico¹⁵, de tal forma que se mantiene en el tiempo.

Hoy en día, la cultura llamada *occidental*, promovida por el sistema económico dominante se ha extendido por casi todo el planeta; sustentada en una nueva filosofía: vender la mayor cantidad de productos a los costos más bajos posibles; lo que ha provocado desde la Revolución Industrial a la fecha, que el ser humano genere de forma masiva bienes baratos que generan altas ganancias a los fabricantes. Nace entonces una sociedad sostenida por el crecimiento económico que busca mejores condiciones de vida a través del consumismo, como el criterio fundamental del progreso. Esta ideología supone el crecimiento del PIB para elevar el nivel de vida de los habitantes de una sociedad y alcanzar la felicidad alrededor de la satisfacción por medio de la adquisición de mercancías de manera fácil, barata (Lipovestky, 2007) y constantemente desechables.

Esto ha llevado a un incremento exponencial en la explotación de recursos naturales¹⁶ a través de la implementación de la obsolescencia programada¹⁷; y desde un punto de vista ecológico -cultural, con el crecimiento poblacional junto con el estilo de vida de las sociedades, el sistema económico, la tecnología, los patrones de consumo, las posibilidades de producción, extracción y desechar recursos y las dinámicas urbanas actuales (Morales, 2011) han impactado directamente en la capacidad de carga¹⁸ (K, Cohen, 1995; Odum y Barret, 2008).

Es así como estas condiciones han establecido una relación nunca vista con la naturaleza en el último siglo y medio, que ha llevado a la humanidad a la crisis civilizatoria actual. También es importante a decir de Georgecu-Roegen (1950 en Carpintero, 2006) que existe la *“necesidad de entender el proceso económico como un proceso histórico, evolutivo que*

¹⁵ Autopoiesis: la capacidad de un sistema biológico de autoreproducirse y de mantenerse a sí mismo. Este término fue acuñado por Humberto Maturana y Francisco Varela en 1973 (Parada, 2020).

¹⁶ Estudios de Krausmann *et al.*, (2018) señalan que la explotación masiva de recursos naturales se multiplicó en un factor de 12 desde 1900 hasta 2015 hasta alcanzar 89 GTON de materiales anuales.

¹⁷ La obsolescencia programada se refiere a la elaboración programada de algún producto que se volverá obsoleto en un corto tiempo (Martínez y Porcelli, 2016).

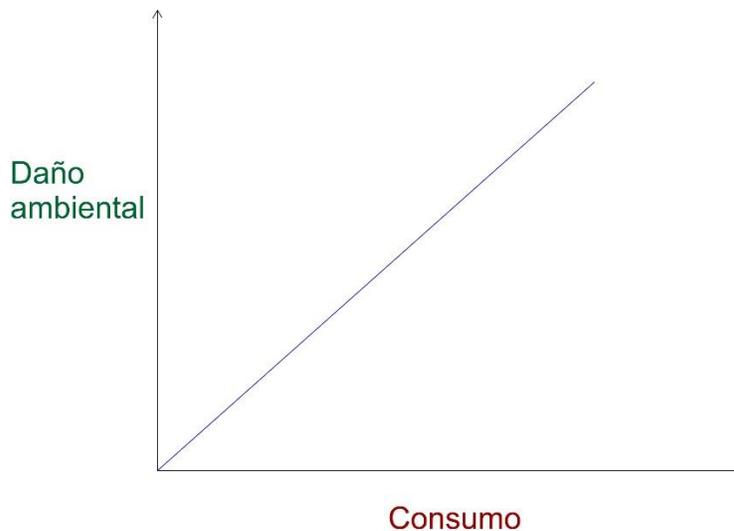
¹⁸ Capacidad de carga (K): es la carga máxima que se puede soportar un ecosistema para proveer recursos naturales a una sociedad (Catton, 1986).



implica cambios irreversibles”. Es por ello, que el estudio de la termodinámica de las sociedades actuales es indispensable para la comprensión de la capacidad de carga, de las dinámicas poblacionales (Tabla 5) y del capital, pues a pesar de que hay autores como Rees (1996) que señala que *“la economía humana es una estructura disipativa altamente ordenada, dinámica y lejos del equilibrio...”*, y dependiente del entorno, este tipo de afirmaciones son contrarias a las leyes de la termodinámica.

Parte de esta irreversibilidad en los procesos sociales, el capitalismo es responsable de la amplia promoción de la explotación de energía y recursos, en tanto que la capacidad de carga de los ecosistemas hoy en día enfrenta graves problemas que ponen en peligro la disponibilidad de recursos para la humanidad (Figura 7). De hecho, hay estudios que relacionan directamente el consumo con el deterioro ambiental (Morales, 2011). Por tanto, este modelo económico no es sostenible porque no toma en cuenta la finitud del planeta, ni la segunda ley de la termodinámica para llevar a cabo sus procesos.

Figura 7. Relación entre el daño ambiental y el consumo



Fuente: Elaboración propia de autor con base en Morales (2011)

Para exacerbar esta situación, el optimismo tecnocrático que rige las políticas y la toma de decisiones en el entorno urbano, puede hacer caer en la trampa a los políticos, empresarios y ciudadanía, de pensar que la tecnociencia es un factor imperante que permite aumentar la



capacidad ecológica de los sistemas de abasto y provisión para las urbes (Rees, 1995), creyendo que es posible hacer más eficiente la extracción de recursos, la generación de productos (plásticos, por ejemplo), su desplazamiento (que cada vez recorren mayores distancias para llegar a lugares específicos) y la producción de alimentos en tiempos más cortos; sin afectar los ciclos biogeoquímicos, deteriorar los ecosistemas y retroalimentar positivamente los problemas ambientales (Echeverría, 2003).

Al pensar que la tecnología y el desarrollo económico hacen más eficiente las actividades humanas, se exacerban los consumos de energía y materiales, ratificando la paradoja de Jevons¹⁹ (Giampietro y Mayumi, 2018; Latouche, 2009). Este comportamiento metabólico de las ciudades acelera la explotación intensiva de recursos, lo que pone en riesgo su disponibilidad, aumenta la entropía y con ello, se incrementan las corrientes contaminantes, lo que en el tiempo pueden provocar su colapso (Dimond, 2006).

Es por ello, que el aspecto más importante que el sistema cultural actual tendría que considerar es que el planeta es finito y hay límites termodinámicos para el uso de los recursos naturales que permiten la construcción de las sociedades humanas, tal como lo señala Latouche (2012): *“como todas las especies vivas, el hombre debe metabolizarse con su entorno natural. Como cualquier sociedad humana del decrecimiento, deberá organizar la producción de su vida, y para ello, utilizar de manera razonable los recursos de su entorno...”*.

Tabla 5. “¿Cómo van a interactuar la población mundial y la economía mundiales en expansión con la capacidad de carga limitada de la tierra y adaptarse a ella en próximos decenios?”

La capacidad de carga es un límite de la naturaleza utilizado por la sociedad para saber la cantidad recursos naturales que un ecosistema le puede proveer. Cualquier población que sobrepasa este límite, pone en riesgo su sostenibilidad en el tiempo; y si su consumo se mantiene por encima de dicha capacidad de carga, será cada vez más difícil que se recupere, incrementando la vulnerabilidad de dicha población.

Ahora bien, si una ciudad o población mantiene un equilibrio con su entorno, el deterioro ambiental es temporal, pues

¹⁹ La paradoja de Jevons establece que *“en el largo plazo, un incremento en la eficiencia en el uso de un recurso generará un incremento en el consumo de este recurso, no un decremento”* (Giampietro y Mayumi, 2018). En palabras de Latouche (2009; 46): *“Las tecnologías eficientes incitan el consumo”* y con ello, mayor explotación de recursos naturales; así como el acceso a dicha tecnología, pues *“facilita la vida”* de los consumidores.

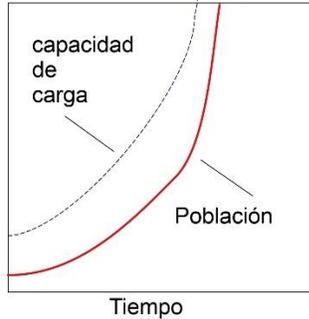


tiene las facultades de regenerarlo; si no es factible, o es necesario mucho tiempo para su recuperación, entonces el daño ambiental será permanente. Es por ello, que se han determinado cuatro diferentes maneras en que una sociedad puede aproximarse a su capacidad de carga.

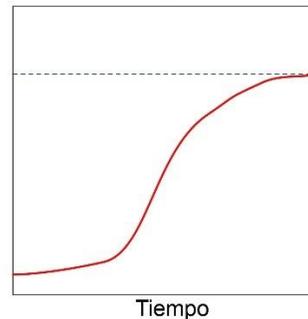
La primera de ellas es que una población puede crecer sin ninguna interrupción siempre y cuando esté muy alejada de la capacidad de carga de los ecosistemas circundantes (Figura 1, inciso a).

En la segunda posibilidad (Figura 2, inciso b), la ciudad puede estabilizarse suavemente por debajo de la capacidad de carga, mediante un comportamiento llamado de forma *S* (sigmoideo) o crecimiento logístico y mantenerse ahí en el tiempo, pero eso es muy riesgoso, pues debe mantener muy controlado sus consumos.

Figuras 1 y 2. Posibilidades de aproximación de una población con su capacidad de carga (a y b)



a) Crecimiento Continuo



b) Aproximación sigmoidea al equilibrio

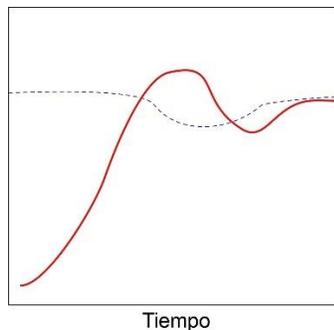
Fuente: Meadows *et al.*, (2012)

Cabe señalar que estas dos primeras posibilidades ya no son factibles para la población mundial actual, pues ya está por encima de sus límites biofísicos (Rockström *et al.*, 2009).

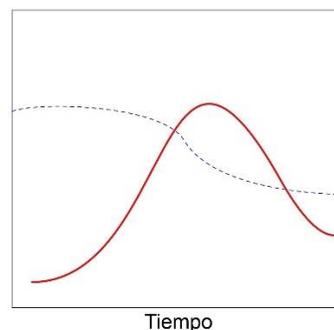
Ahora bien, la tercera posibilidad (Figura 3, inciso c), para una sociedad que está en crecimiento como la actual, ya rebasó su capacidad de carga y por tanto se han generado daños masivos y permanentes. En este caso y en algunas situaciones, la huella ecológica puede oscilar alrededor del límite antes de ajustarse al mismo. Este fenómeno se llama oscilación amortiguada y puede ya haber una extralimitación de la capacidad de carga.

Finalmente, la cuarta posibilidad la sociedad rebasa su capacidad de carga, causando daños graves y permanentes en la base del ecosistema. “Si esto llegara a ocurrir, la sociedad y la economía se verían forzadas a decaer rápidamente hasta alcanzar un nuevo equilibrio con la capacidad de carga recién reducida en un nivel mucho más abajo” (Meadows *et al.*, 2012) En este sentido ya existe una extralimitación y, por ende, un colapso.

Figuras 3 y 4. Posibilidades de aproximación de una población con su capacidad de carga (c y d)



c) Extralimitación y oscilación



d) Extralimitación y colapso

Fuente: Meadows *et al.*, (2012)



1.3. El metabolismo urbano

En el libro “El Capital” Karl Marx determinó que existe una base de “*un intercambio entre la sociedad y la naturaleza*”, es decir, que el ser humano a través de su quehacer productivo daba forma al medio circundante en virtud de obtener de él todo aquello que necesitase para su conformación como ser dentro de una sociedad determinada (Toledo, 2013). Aunado a esto, el hombre determinó que todo trabajo y producto tienen un valor, a lo que Marx lo estableció como una forma abstracta del trabajo, y con ello, hay dos formas de íntimamente relacionadas con el entorno y entre ellas: un intercambio ecológico y uno económico (Toledo, 1981).

Es por ello por lo que “*la historia de la humanidad no es ... más que la historia de la expansión del socio-metabolismo*” (González y Toledo, 2011), se ha configurado en función del consumo y transformación de energía (y materiales), es decir la energía *endosomática* y *exosomática*²⁰, lo que ha ido configurando la relación socio-metabólica (“exo/endo”) que, de acuerdo con la disponibilidad de recursos, ha promovido al paso del tiempo el crecimiento y la complejidad de los constructos humanos (Figura 6).

Esto es lo determinado como “*metabolismo social*”, “*metabolismo -socioeconómico*”, o “*metabolismo industrial*”, que involucra la comprensión de las relaciones entre los sistemas sociales, naturales y biofísicas; por lo que considerado como una herramienta teórica y metodológica²¹ que hace una analogía del comportamiento humano con el natural (Fisher-Kowalski, 1998).

Es decir, donde los seres vivos y los constructos humanos “*en sus relaciones operacionales* [autopoiesis], *los componentes moleculares* [actores sociales, estructura, jerarquización, organización, su cultura] *determinan una red dinámicamente organizada y enlazada de*

²⁰ El consumo de energía también se manifiesta de manera individual, ya que cada ser vivo consume y desecha energía, es decir una relación biometabólica (González y Toledo, 2011)

²¹ La metodología consiste en la descripción y la cuantificación de los flujos de materiales y energía entre el sistema social y su entorno natural (González y Toledo, 2011)



transformación (metabolismo), que produce los componentes moleculares de la membrana [frontera o límites], lo que a su vez permite la operación de la red y así sucesivamente” (Velázquez, 2007).

Mientras que la diferencia entre ellos es que en la naturaleza los organismos vivos, al igual que los ecosistemas poseen gran cantidad de orden interno y disipan hacia el entorno baja entropía, lo que significa que su aprovechamiento es de alta eficiencia. En tanto que, los constructos humanos, entre ellos, las ciudades, presentan bajas eficiencias en el uso energético con altas disipaciones, lo que hace que aumenta su riesgo de sucumbir ante el aumento población (Meadows *et al.*, 2012), el sistema económico y el cambio climático.

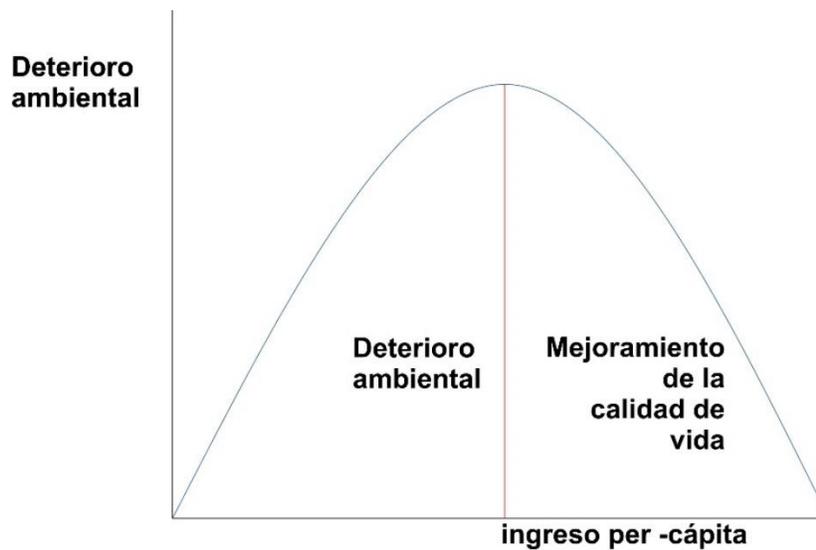
Ahora, si bien ambas realidades (la natural y la social humana) son regidas por igual por las leyes de la termodinámica, la máquina compleja urbana es más susceptible al colapso y muerte térmica (Odum y Barret, 2008) si no disipa rápidamente la entropía, lo que provoca un enorme deterioro ambiental a sus alrededores, siendo ésta la causa de la crisis civilizatoria.

Esta vulnerabilidad urbana se debe a su configuración y funcionamiento social, político, económico, cultural; donde la energía y los materiales se mueven de forma lineal, es decir, que existe una extracción de recursos, que son transformados, se consumen dentro del sistema y, finalmente son desechados (González y Toledo, 2011), de los cuales debido a los cambios fisicoquímicos que sufrieron no pueden ser reincorporados a los ecosistemas, y por tanto, se disipa al ambiente grandes cantidades de entropía.

Aunado a lo anterior, es crucial señalar que desde el sistema capitalista sostiene que la igualdad social y el bienestar humano se alcanzarán únicamente desde una postura crematística, reflejada en el incremento del PIB, basándose en la falsa “*Curva Ambiental de Kunitz*”, (Figura 8) relacionando a la degradación ambiental y el crecimiento per cápita; que erróneamente ha sustentado el comportamiento de los asentamientos humanos en casi todo el planeta, y donde considera al deterioro ecosistémico como un “*mal necesario*” o un efecto colateral en pro de la generación de riqueza (Díaz, 2020a).



Figura 8. La mal llamada “Curva de Kunitz”



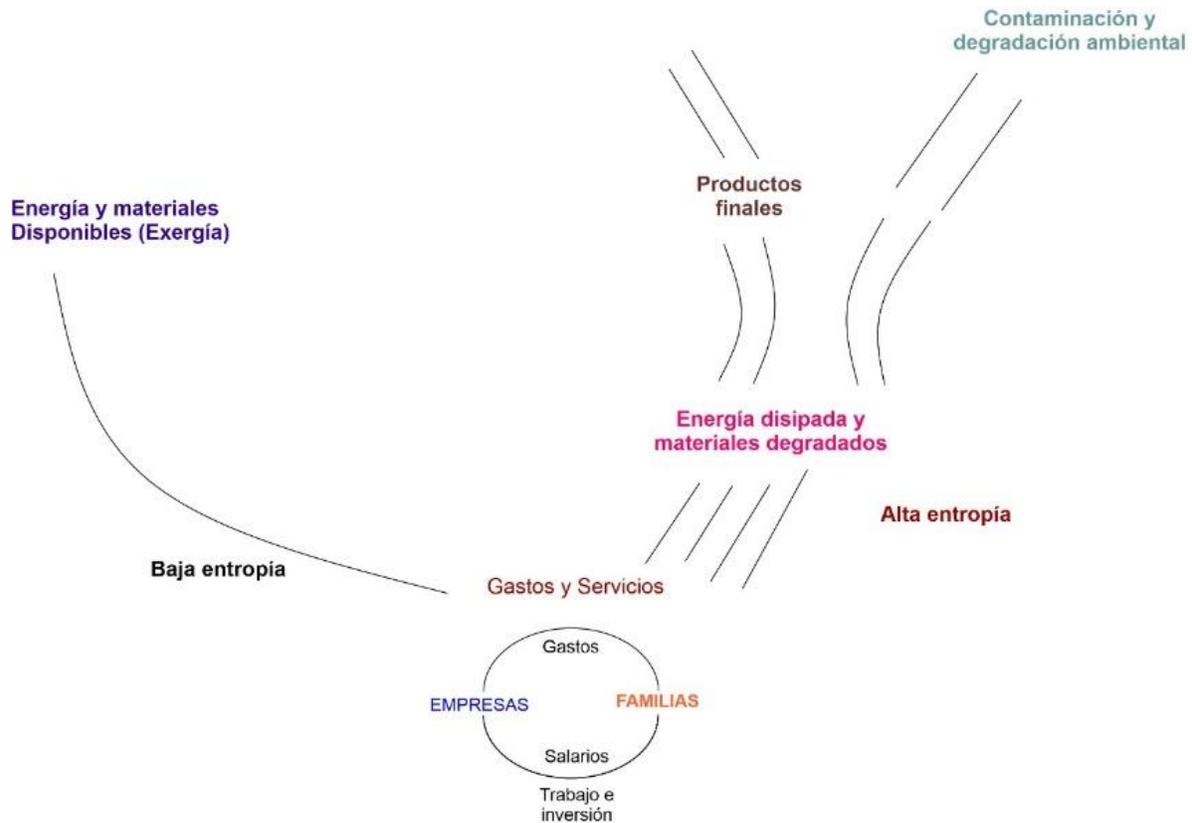
Fuente: Díaz (2020a)

Esto significa que las creaciones humanas son caóticas (sobre todo las grandes ciudades en la actualidad), donde buscan minimizar su desorden únicamente a través de la deposición de sus residuos fuera de sus fronteras o límites (Díaz y Pulecio, 2016; Figura 9). es decir, las “*externalidades negativas*”, que no son cuantificadas en el balance económico y en el incremento del PIB (Latouche, 2009; Martínez-Alier y Roca, 2013).

Es por ello por lo que, al comprender las Leyes de la Termodinámica, sobre todo la Tercera Ley (Tabla 4) la búsqueda de la estabilidad de las ciudades a través de la gestión de la entropía y la máxima reducción de los residuos y afectaciones sociales entonces será posible un equilibrio urbano bajo estas leyes naturales.

Este objetivo ha llevado a los científicos a realizar diversos estudios del metabolismo urbano, que está definido como la “*suma total de los procesos técnicos y socioeconómicos que ocurren en las ciudades, resultando en crecimiento, producción de energía y eliminación de residuos*” (Kennedy *et al.*, 2007 y Toledo, poner cita metabolismo social).

Figura 9. Flujos de energía y los flujos de la economía



Fuente: Rees (1995)

El estudio metabólico urbano debe involucrar el “*seguimiento a los movimientos de los bienes y sustancias de una ciudad desde el medio circundante y de abastecimiento y consumo y devuelta a los compartimientos aire, agua y suelo*” (Díaz, 2014). Para el entendimiento de dichos movimientos (flujos) se debe conocer las cualidades espaciales, temporales y culturales del asentamiento urbano; teniendo en cuenta la forma en que se acumulan y desplazan los bienes, servicios y stocks, que permiten el ciclo metabólico (Dijst *et al.*, 2017, Figura 10). En este sentido, González y Toledo (2011) hacen hincapié en las dimensiones *tangible e intangible*²² del metabolismo, siendo ésta última la que da impulso y sentido a la primera.

²² La parte intangible del metabolismo se refiere a todas las cuestiones culturales, es decir, la parte social. Mientras que la tangible es la cuestión medible a través de la ingeniería, economía, etc. (Gonzalez y Toledo, 2011).



La parte tangible del metabolismo se fundamenta en balances de materia y energía, bajo los Principios de la Conservación de Materia y Energía (Díaz, 2014). Para poder analizar esto, la tangibilidad metabólica incluye: 1) *apropiación*, que se refiere a toda extracción de recursos; 2) *transformación*, que consiste en todos los procesos de producción de bienes de consumo, junto con toda la infraestructura que la urbe necesita; 3) *circulación*, es la movilidad que tienen todos los bienes generados dentro y fuera del centro urbano, que va junto con el 5) *consumo*; y finalmente, 6) la *excreción* que todos los desechos generados y que serán expulsados del sistema (Céspedes y Morales, 2018; González y Toledo, 2011).

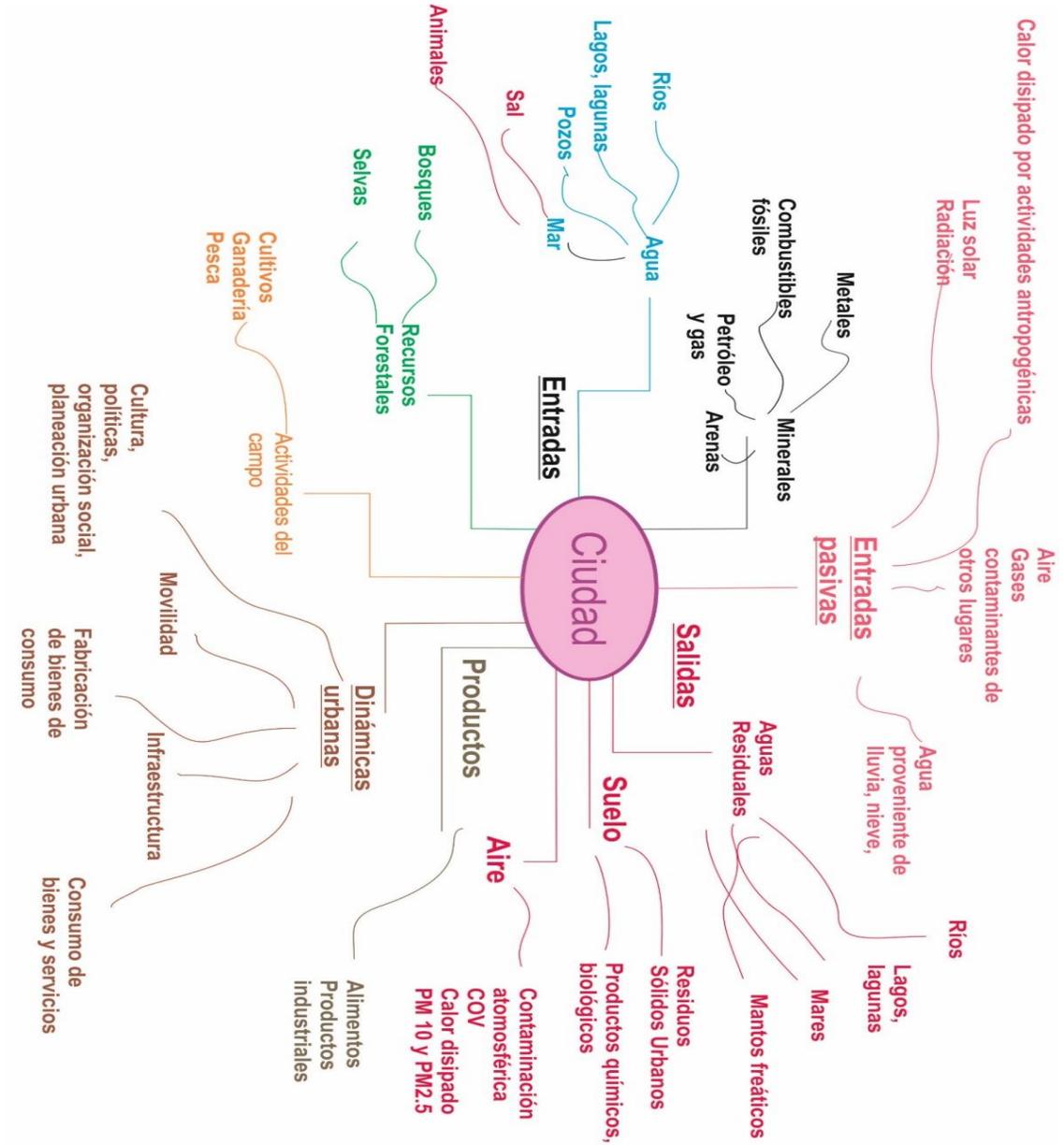
Mientras que la parte intangible hace referencia a las cuestiones “*invisibles*” o “*inmateriales*” de la máquina térmica urbana, correspondiente a todas las relaciones sociales que dan sentido al consumo y uso de todos los recursos utilizados de ella (González y Toledo, 2011). Este componente determina la complejidad del estudio metabólico, dado que las condiciones humanas son cambiantes en el tiempo. Es por ello, que ningún estudio de este tipo es determinante, sino que únicamente representa el comportamiento de una ciudad por su contexto histórico, evolutivo, económico, etc

Asimismo, hasta el día de hoy no hay una sola metodología definitiva para sus estudios. Empero, al complementar los estudios metabólicos con los termodinámicos es posible el mejorar entendimiento urbano y su posible alcance de la sostenibilidad.

Es así, que el reto actual de los estudios metabólicos basado en la comprensión de su complejidad es: que se reconozca la fiabilidad de las leyes naturales, y con ello, el reconocimiento que las ciudades se rigen en éstas, y, por tanto, la búsqueda de la gestión eficiente de la energía y los materiales, al mismo tiempo, cambiando las políticas públicas en torno al crecimiento poblacional, la expansión y el ajuste urbanos a los límites biofísicos locales y regionales.



Figura 10. Flujos metabólicos de una ciudad



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: Algunos puntos se obtuvieron de Decker *et al.*, (2000)



CAPÍTULO 2. MARCO DE REFERENCIA

En este capítulo se exponen los orígenes, su evolución y que finalmente en el siglo XX se comenzaron a llevar a cabo los primeros estudios metabólicos urbanos. Asimismo, se nombran los primeros exponentes y sus trabajos que destacaron primeramente en Norte América, Europa y Asia, y que poco a poco se han extendido a América Latina, en donde los trabajos más relevantes que datan del 2010.

Se destaca también las principales aportaciones y retos que los estudios metabólicos presentan hasta el día de hoy, haciendo referencia que en el caso de América Latina existen problemas en la disponibilidad de información, y no se han tomado en cuenta estos análisis por parte de los gobiernos locales y consecuentemente, no son aplicados en las políticas públicas, aunque comienzan a darse incipientes cambios sustentados en los conocimientos ancestrales de la región.

Finalmente, se hace énfasis en que las investigaciones de esta naturaleza deben contemplar la parte intangible, es decir, la social, histórica y cultural de cada sociedad, pues da el sentido a todo consumo de recursos y es parte del entendimiento de la complejidad del fenómeno metabólico. En el caso de América Latina, es imperante retomar el conocimiento ancestral, pues las ciudades prehispánicas tuvieron una relación más armoniosa con la naturaleza, y aunque también algunas de ellas colapsaron, este saber puede ser un gran aporte al conocimiento y experiencias actuales.



2.1. Precusores y Estudios actuales del metabolismo urbano

El estudio metabólico de una ciudad es el resultado de algunas analogías previas con referencia al estudio de la biología y el comportamiento del cuerpo humano como un sistema abierto (Toledo, 2013). Las primeras de ellas, según Céspedes y Restrepo (2018) datan del siglo XVII cuando se hicieron importantes avances médicos en humanos; ejemplo de ello, el estudio de William Harvey (1628) que analizó el proceso de circulación de la sangre y de respiración; Santorio Santorio (1614) con los primeros estudios del metabolismo; y Thomas Willis y Albrecht von Haller (1717) quienes describieron el funcionamiento del sistema nervioso; lo que contribuyó a un cambio de paradigma en los científicos de esa época considerando que la naturaleza, la sociedad y los seres humanos se rigen por flujos y transformaciones de materiales para sostener su existencia.

Gradualmente, estas metáforas se fueron extendiendo hacia la configuración de los sistemas urbanos con los humanos y el entendimiento de sus componentes. Es entonces que Adam Smith (1776) señaló que el mercado laboral y los bienes funcionan de manera similar a cómo circula la sangre en las venas, por ello, “para que la economía sea próspera debe mantenerse en movimiento y no fija o estable” (Céspedes y Restrepo, 2018).

Ahora bien, como ya se mencionó previamente el término “metabolismo” fue acuñado por Karl Marx en el siglo XIX cuando se en su libro “El Capital”, definiéndolo como el proceso en el que una sociedad transforma a la naturaleza través del trabajo (los alrededores) y al hacerlo, determina su productividad y sus relaciones sociales (naturaleza interna) (Folarodi, 2001).

A partir de esto, junto con el evidente crecimiento urbano a consecuencia de la Revolución Industrial, y los ya visibles efectos de la contaminación, promovieron incipientes estudios de flujos en entornos urbanos, destacándose el “*Ensayo sobre el metabolismo de Berlín*” (1894) de Theodor Weylin, donde se estudiaron los flujos entrantes y salientes de materiales de esta ciudad (Derrible *et al.*, 2021). Asimismo, Ernest Burges (1925) sociólogo



urbano canadiense consideró que la división y la evolución del trabajo son parte fundamental del metabolismo urbano, acuñando por primera vez este término, para describir dichos fenómenos (Zhang, 2019).

Fue hasta 1965 cuando Abel Wolman desarrolló el concepto “metabolismo urbano” en su trabajo “*The metabolism of cities*”, a través de la cuantificación de flujos de energía y materiales (agua, combustible, alimentos) de una ciudad hipotética de un millón de habitantes, determinó consumo de agua y materiales per cápita (Díaz, 2014; Céspedes y Restrepo, 2018; Kennedy *et al.*, 2008).

Este trabajo fue un parteaguas para el desarrollo de otros estudios, generando interés en la interacción de las ciudades con los ecosistemas circundantes (Tabla 6), impulsando importantes aportaciones y desde diferentes áreas del conocimiento y profesiones (ingeniería, ecología, planeación urbana, arquitectura).

Cabe señalar que los estudios metabólicos de países como China, Estados Unidos, Canadá, de la Unión Europea, Japón, entre otros, son indispensables para pensar las políticas públicas y han sido factor determinante ante las medidas de gestión de materiales, haciendo en algunos casos ciudades mucho más resilientes y que se acercan a la sustentabilidad.

Tabla 6. Aportaciones al estudio del metabolismo urbano

Autor/año	Aportaciones
Odum (1971)	Propuso el Análisis de Emergía (energía útil) en el estudio de ecosistemas. Describió el metabolismo en términos energéticos, tomando en cuenta la luz solar y sus equivalentes. Estableció la primera escuela del estudio metabólico.
Duvigneaud and Demayeyer De Smet (1977)	Estudió el metabolismo de Bruselas incluyendo el balance de la energía de los alrededores.
Newman (1999)	Estableció un marco de referencia para el estudio metabólico de Brisbane y Southeast Queensland usando aspectos de la calidad de vida.
Bettinni (1998)	Estableció el concepto de ecología urbana.
Hendricks <i>et al.</i> , (2000)	Analizaron el flujo de materiales de las ciudades de Viena y las tierras bajas de Suiza con la finalidad de ser utilizadas en las políticas públicas.



Bruner y Rechberger (2004)	Establecen un manual para el Análisis de Flujo de Materiales
Kennedy <i>et al.</i> , (2008)	Hacen una revisión de los cambios que sufre el metabolismo urbano (análisis de materiales)
Barles (2009)	Estudio del flujo de materiales de Paris y las regiones aledañas
Browne <i>et al.</i> , (2012)	Proponen una metodología para medir la eficiencia metabólica en Irlanda.
Baccini y Bruner (2012)	Propusieron los Análisis de Flujos de Materiales (Segunda escuela para el estudio metabólico). En su libro “ <i>Metabolism of the Anthosphere</i> ” establecieron una metodología de conteo de stocks y flujos de masa que siguen siendo vigentes en la actualidad. A partir de su trabajo se empezaron a hacer cuantificaciones de agua, alimentos, energía, materiales de construcción, etc.
Chrysoulakis <i>et al.</i> , (2013)	Establecen un nuevo marco metodológico para el análisis de materiales
Min <i>et al.</i> , (2019)	Proponen una aproximación termodinámica para el estudio metabólico de las ciudades, junto con su análisis de eficiencia

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

En el caso de América Latina, los estudios metabólicos son recientes, es posible atreverse a decir que se han iniciado a partir de alrededor de unos diez años atrás, es decir desde 2010, y se han hecho principalmente análisis de flujos de materiales. En la tabla 7 se destacan los principales trabajos hasta la fecha.

Tabla 7. Trabajos de metabolismo urbano para ciudades latinoamericanas

Autor/año	Ciudad de Estudio
González y Schandl (2008)	Hacen un estudio de flujo de materiales de la Ciudad de México en el periodo de 1970 a 2003.
Díaz (2011)	Da una aproximación holística de la problemática de la ciudad de Bogotá, Colombia
Delgado (2012)	Datos sobre consumos de materiales y energía de la Ciudad de México.
Inostroza (2013)	Metabolismo de materiales de Punta Arenas, en Chile
Serna <i>et al.</i> , (2014)	Datos de metabolismo de materiales de Pereira y la Zona Metropolitana Occidente de Colombia
Luna (2015)	Estudio de metabolismo de Cuautla, en el Estado de Morelos, México.
Testa <i>et al.</i> , (2016)	Metabolismo hídrico de la Ciudad de Cuenca, Ecuador.
Villalba (2016)	Metabolismo de materiales de Ciudad de Tandil – Argentina
Jaramillo (2017)	Metabolismo de materiales de Ciudad de Cuenca, Ecuador.

Estudios Teóricos o híbridos



González y Toledo (2011)	Elaboran un libro que explican el metabolismo social desde un recuento de la historia ambiental desde las sociedades primitivas hasta nuestra era. Aparece el metabolismo tangible e intangible como aspectos esenciales para entender la complejidad de la sociedad y sus patrones de consumo
Delgado <i>et al.</i> , (2015b)	Recaban información sobre datos poblacionales, consumo de energía, agua, alimentos, emisiones de GEI, aguas residuales y residuos sólidos de Buenos Aires, Ciudad de México, Río de Janeiro y Sao Paulo.
Rosales (2018)	Establece lo que se llama Balance ambiental que a partir del metabolismo de la Ciudad de México busca calcular la capacidad de carga de los ecosistemas circundantes y de la propia urbe.

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

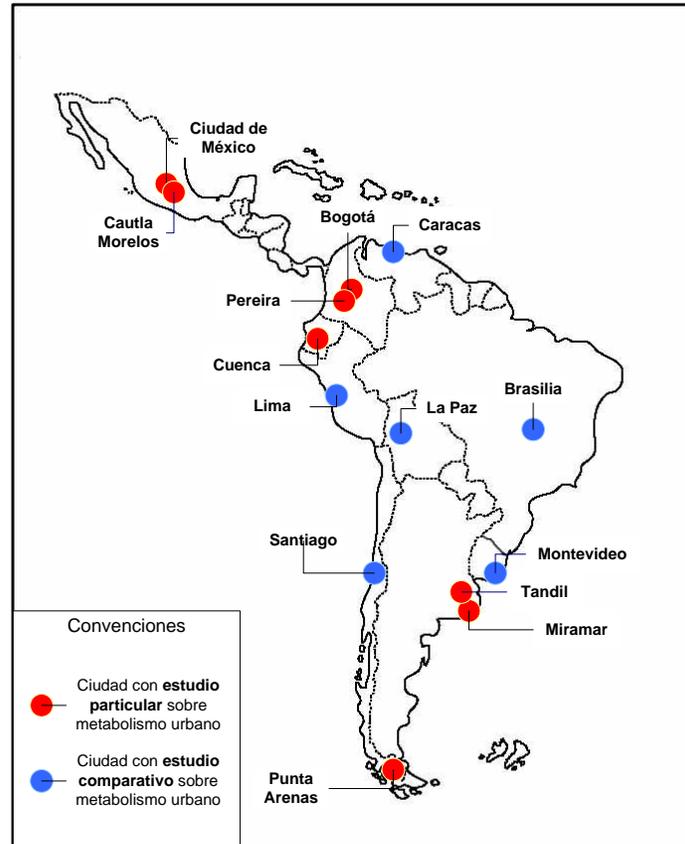
Es importante señalar que uno de los retos más importantes de los investigadores latinoamericanos es enfrentarse a la disponibilidad y acceso a datos, la asimetría de la información y limitantes burocráticas (Delgado *et al.*, 2012); que hacen algunos autores reciclen dichas cifras, aunado, además a que existen pocos especialistas para hacer este tipo de estudios ante la problemática actual de la región²³ (Figura 11), lo que ha provocado que en algunos casos algunos estudios son únicamente comparativos y por manejar de manera homogénea algunas zonas metropolitanas, tal es el caso de la Ciudad de México, Santiago, Caracas, Lima, La Paz, Brasilia y Montevideo (Díaz, 2020).

Se aprecia entonces, que es necesario muchos más estudios metabólicos de las ciudades de América Latina. Es urgente que las universidades locales en cada país empiecen a incorporar en sus planes de estudio en ingeniería, planeación urbana, arquitectura, biología, asignaturas relacionadas con el metabolismo urbano. Al mismo tiempo, que las investigaciones hechas sean consideradas dentro de las políticas de urbanismo locales y que se busque la generación de información, hacer minería de datos, análisis y estudios profundos, lo que requiere mucho trabajo y apoyo de instituciones.

²³ Las ciudades latinoamericanas presentan un crecimiento desordenado y poco planeados, lo que suele ser excluyentes, lo que a largo plazo están generando problemas ambientales serios y su inviabilidad económica, ecológica y social. Su crecimiento acelerado desde los años sesenta ha contribuido a la conformación de megaciudades de más de 22 millones de habitantes, y presentan alta complejidad social y malos patrones de consumo de materiales y energía (Delgado *et al.*, 2012).



Figura 11. Estudios Metabólicos en América Latina entre 2010 y 2018



Fuente: Díaz (2020b)

2.2 Aportaciones del metabolismo urbano

Los estudios metabólicos han contribuido enormemente al conocimiento y entendimiento de las ciudades en Europa y Asia y Norte América, y del planeta mismo (Chrysoulakis *et al.*, 2013; Rockström *et al.*, 2009). Principalmente los estudios de metabolismo urbano se realizan desde una temporalidad, evidenciando un constante cambio (aumento) en el flujo de sus materiales y energía, sobre todo desde la segunda mitad del siglo XX; pueden ser realizados a cualquier escala (regional y local) y nivel de agregación, teniendo como ejemplo el estudio de Krausmann *et al.*, (2018) a escala planetaria, se dio evidencia del impacto negativo del ser humano en la pacha mama (Steffen *et al.*, 2015).



Asimismo, los estudios metabólicos han aportado gran cantidad de información para el entendimiento de las ciudades como “ecosistemas”, así como en la creación de herramientas que pueden ayudar a la gestión de la entropía y de flujos, de resiliencia y planificación urbana. A partir de modelos matemáticos es posible la definición de estrategias de mitigación de cambio climático, evaluaciones de impacto ambiental o análisis de huella hídrica, ecológica y de carbono; asimismo es factible implementar estrategias de economía circular, análisis de ciclo de vida y capacidad de carga, entre otros (Kennedy *et al.*, 2011).

Otro de los grandes aportes del estudio metabólico urbano es la generación de indicadores, por ejemplo: de consumo agregados, localizados y per cápita de energía y materiales; consumos estratificados por ingresos económicos, de calidad de agua, suelo, aire, y algunas correlaciones entre ellos. En el caso de los modelos matemáticos, es posible dar seguimiento a los flujos desde las regiones de origen hasta su disposición final, al mismo tiempo que se pueden hacer cálculos y seguimiento de todos los flujos dentro del sistema, de la eficiencia de la transformación y el uso, ejecutado en la planeación y gestión urbana (Kennedy *et al.*, 2011) algo que no ocurre en América Latina.

También han permitido la hibridación de la ciencia (González y Toledo, 2011) algo parecido a lo ocurrido con la ecología industrial (Barles, 2010), la ecología urbana, la economía ecológica, la ecología política, la historia ambiental (Dinarés, 2014) y la bioeconomía (Georgescu – Roegen, 1971). Todas estas perspectivas fundamentadas en la ecología, la termodinámica, la historia y la economía han construido perspectivas que reafirman la conflictividad entre los niveles de consumo del ser humano y los límites biofísicos del planeta; por lo cual los estudios metabólicos promueven el concurso de las diferentes ciencias, profesiones, artes y saberes ancestrales, lo que lo hace inter y transdisciplinario.



2.3. Retos que afronta el estudio del metabolismo Urbano

Actualmente, el estudio del metabolismo urbano ha sido una buena herramienta para el entendimiento del actuar del ser humano dentro de una ciudad. Sin embargo, los esfuerzos por alcanzar a la sustentabilidad no se han logrado, entre otras razones, porque no se ha podido derribar el paradigma dominante del consumo (Lipovsky, 2007; Latouche, 2012), sobre todo en cuestiones económicas; existen aún inconsistencias al explicar el metabolismo urbano con la complejidad social y ecológica; se ha quedado en solo un concepto que en el caso de gran parte América Latina no se ha establecido en las políticas públicas, aunque empieza a haber incipientes cambios en Colombia con políticas en Economía Circular (Gobierno de Colombia, 2019) y la reestructuración constitucional en Ecuador y Bolivia con el concepto de Buen Vivir (Gregor Barié, 2014); no existe todavía procesos masificados que modifiquen la linealidad de los flujos metabólicos (Céspedes y Morales, 2018); y no se ha conseguido una conciencia de operar dentro de los límites planetarios so pena de poner en riesgo la existencia humana (Steffen *et al.*, 2015; Rockström *et al.*, 2009; Meadows *et al.*, 2012).

Asimismo, en este tipo de estudios se debe tomar en cuenta que los desechos generados por los centros urbanos no solo tienen impacto en su interior, sino también fuera, a escala regional o incluso global. Ante esto, deben ser consideradas también las relaciones que guardan las ciudades con sus alrededores, a lo que se deben incorporar al tratamiento metabólico metodologías que incorporen estos impactos (Pincetl *et al.*, 2012). Como sistemas heterótrofos, no debe olvidarse que las ciudades, ante su propio crecimiento, dependen cada vez más del exterior aumentando su vulnerabilidad ante los cambios de uso de suelo, regímenes hídricos y climas, entre otros.

Es por ello, que ante la inmutable actuación de la naturaleza sobre estas máquinas térmicas complejas, entre éstas, las leyes de la termodinámica, siempre habrá generación de entropía en virtud de su Principio de Incremento (Cengel y Boles, 2017), más cuando aumentan los consumos de materia y energía, haciendo de esto, el desafío más importante de los estudios



metabólicos, pues la única manera de disminuir la entropía es reduciendo los patrones de consumo actuales insertando a la naturaleza en el diseño urbano y repensando el concepto de PIB porque no incorpora las externalidades del crecimiento económico²⁴ (Latouche, 2012; Martínez-Alier y Roca, 2013) y replanteando el concepto de calidad de vida, tomando como ejemplo reincorporación del conocimiento ancestral (Gregor Barié, 2014).

Por otro lado, en la cuestión metodológica, cabe destacar que predominan los estudios de análisis de materiales, y poco se han analizado los flujos energéticos, por la necesidad de comprender a la termodinámica. Esta omisión explica parcialmente la insostenibilidad ambiental urbana, puesto que el consumo de energía va más allá del consumo de energía exosomática (Barles, 2010) lo que define las relaciones con cualquier ecosistema, especie y el planeta mismo; razón por la cual se convierte en un imperativo la gestión de la entropía.

Es por ello que para un buen estudio metabólico se debe tomar en cuenta: 1) la definición de las fronteras del sistema por cuestiones termodinámicas (reconociendo las relaciones con el entorno), 2) la anunciación y cuantificación de los flujos de materia y energía (balances de materia y energía); 3) el análisis de los procesos y subprocesos de transformación y almacenamiento; 4) el reconocimiento de la incertidumbre asociada a la disponibilidad y asimetría de la información, la elección del método²⁵ (dobles conteos, interdependencia entre los flujos, principalmente en cuestiones económicas o el desglose de los sectores estudiados, a los datos de externalidades) y 5) el estudio concomitante de los aspectos sociales, económicos y ambientales en un periodo determinado de tiempo (Yishin, Hwongwen, 2018; Schandl, *et al.* 2002, en Browne *et al.* 2012).

Finalmente, no se puede considerar hoy en día que un estudio metabólico incluya únicamente la parte tangible como lo señalan González y Toledo (2011). Sin embargo,

²⁴ “Aspirar a mejorar la calidad de vida y no a un crecimiento ilimitado del PIB” (Latouche, 2012).

²⁵ Uno de los grandes obstáculos a la hora de llevar a cabo un análisis metabólico es considerar la pertinencia y falta de los datos en el momento de haber sido recabados (Huang y Mei-Po, 2018), pues en el caso de América Latina, es posible que haya desfases en tiempo, así como la validez de las fuentes que los proporcionan.

De igual modo, en muchos casos, los estudios de metabolismo urbano son conteos estadísticos, en donde los datos recolectados (y los faltantes deben ser estimados) se expresan en indicadores asociados con la sustentabilidad, el consumo y producción, el cambio climático y energía, transporte y manejo y accesibilidad a los recursos naturales, entre otros (Huang *et al.*, 2015).



resulta complejo algunos aspectos como: determinar los límites que intervienen entre las interacciones naturales y humanas (Pincetl *et al.*, 2012), donde cada vez más, la intervención humana es más directa en los ecosistemas; las características poblacionales para explicar los parámetros de consumo, por ello se incluyen aspectos como demografía, educación, accesibilidad de recursos y servicios, empleo, equidad de género, cumplimiento de las leyes y derechos humanos; y la complejidad cultural que determina los patrones de explotación, consumo y generación de desechos dentro de una ciudad, entre otros. Esto es el punto más difícil de abordar, pues la sociedad actual está influida por una ideología de consumo de recursos, que, al día de hoy, a pesar de que los datos muestran el riesgo de colapso ambiental que existe, los patrones de consumo no han disminuido, sino se han incrementado (Latouche, 2012; Rockström *et al.*, 2009). Es imperante entonces enfatizar que el metabolismo no es sólo un análisis de flujos, sino que es un estudio integral que debe ponerse en contexto social, cultural e histórico siempre dinámico.

Esta complejidad ha sido estudiada por Fisher-Kowalski (2000; 2011); Martínez Allier (2010), González y Toledo (2011), Toledo (2013), Gerogescu – Roegen (1971), Leff (2008), Latouche (2009a; 2009, 2012), Esteva (2011), quienes han hecho críticas al sistema económico dominante y los efectos que eso está causando a las propias relaciones humanas, la valorización por las culturas originarias (que el sistema económico está desplazando), y la posibilidad de construir una sociedad más participativa que podría contribuir con una mejora en los patrones de consumo actuales.

No es posible pensar que las ciudades en América Latina surgieron después de la conquista española, sino que anteriormente, existieron urbes que fueron capaces de mantener una profunda relación con la naturaleza, resultado de un conocimiento y tecnología desarrolladas a lo largo de miles de años en donde todo ser vivo y el entrono están íntimamente relacionados, lo que hace al ser humano parte indelible de la Pachamama (Ramos, 2007).

Es así que, para comprender el contexto actual de cualquier ciudad latinoamericana es importante una revisión histórica porque ello dará un panorama más completo de su



evolución y complejidad. Y finalmente, todo análisis metabólico se explica dentro de un periodo determinado de tiempo, en función de las dinámicas urbanas, las políticas públicas, los hechos históricos; por tanto, para la mejor planeación y gestión de la máquina térmica antropogénica en esta región se debe poseer un sistema de información de flujos constantemente monitoreado y actualizado como ya se hace en Norte América, Europa y algunos países asiáticos.



CAPÍTULO 3. HISTORIA DE LA ZONA METROPOLITANA DE TOLUCA (ZMT)

En este capítulo se hace un recuento histórico de la conformación de la Zona Metropolitana de Toluca, objeto de estudio del presente trabajo, pues esto dará claridad a la comprensión a la complejidad de su organización, sus dinámicas y su problemática actual.

Se hace un recuento de las políticas federales que afectaron su conformación, cuya metodología mecanicista y obsoleta, sigue vigente en los actuales planes de desarrollo municipales y estatal, aunada a una perspectiva sustentada en el crecimiento indiscriminado y en la industrialización. Los resultados de ello han sido problemas de crecimiento urbano desordenado y disperso, aunado a problemas de infraestructuras viejas, sin mantenimiento, que a su vez contribuyen a diversos problemas sociales y ambientales.

3.1. Contexto Prehispánico del Valle de Toluca

Muchas de las ciudades importantes de Latinoamérica tienen un pasado prehispánico, es decir, eran urbes muy bien estructuradas mucho antes de la llegada de los conquistadores. Es por ello, que no debe considerarse que su historia se constituye a partir de la Era Colonial.

Las civilizaciones precolombinas tenían una estrecha relación con la naturaleza, especialmente con el agua. Ciudades como Bogotá, Lima, Ciudad de México, Buenos Aires, Santiago de Chile, entre otras, que se construyeron a lado de ríos o incluso sobre lagos, lo que permitió su florecimiento a través de la hidrología, ingeniería civil, sistemas



de agricultura intensiva, conocimiento del entorno (astronomía, ciclos del agua, de los ciclos biogeoquímicos) y que sin embargo, con la conquista y la evangelización católica, todo este conocimiento quedó en algo pagano y sujeto de herejía, por lo que nunca fue tomado en cuenta en la nueva planeación de las ciudades de la Nueva España, que en algunos casos siguieron el trazado inicial y en otros, se impuso las nuevas posturas sobre lo ya existente (Díaz, 2020b).

En este sentido, la actual Zona Metropolitana de Toluca no escapa a sus raíces prehispánicas, cuyos primeros habitantes datan de alrededor de 6500 años a.C., que se asentaron en lo que hoy es el Valle de Toluca, a los pies de la zona lacustre del Alto Lerma²⁶ (Albores, 1995; Trejo y Arriaga, 2009), donde los primeros habitantes se dedicaron a la caza, pesca, tejido de tule (proveniente de las ciénegas), la recolección y la agricultura; generando poblaciones de habla otomí, mazahua y matlatzica (Albores, 1995).

Con la conquista española, los habitantes del Valle de Toluca fueron sometidos a cambios radicales en su estructura social y con ello, un reajuste en la estructura de la comunidad indígena, basada en unidades ganaderas como primarias, administradas por los españoles y las agrícolas por los conquistados, lo que ocasionó modificaciones en las zonas lacustres del valle, el desplazamiento de algunos productos agrícolas por forrajes, la modificación de causes de arroyos o la disponibilidad de manantiales para los animales de las haciendas, y finalmente que los nativos dejaron de ser dueños de los recursos básicos (agua y tierra), aunque continuaron alimentándose de los productos de las ciénegas (insectos, acosiles, pescaditos, juil, ajolote y ranas; Viesca *et al.*, 2011) hasta la década de 1950.

Durante la Colonia, la situación de la tenencia de la tierra en lo que hoy es la ZMT se mantuvo dentro de la “República de Indios” como comunal (y actividades que se llevaban a cabo en la zona lacustre), manteniendo el patrimonio indígena; pero fue con las Leyes de Reforma y la entrada de una ideología liberal, en donde se comenzó la acumulación de los

²⁶ La cuenca alta del Río Lerma nace en Almoloya del Río y llega a lo que hoy es la Presa Solís en Guanajuato. Cubre una extensión de 4,500 km², de los cuales entre 800 y 1000 km² correspondían a territorio acuático y abarca 19 municipios mexicanos (Almoloya del Río, Atizapán, Calimaya, Capulhuac, Chapultepec, Joquicingo, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Otzolotepec, Rayó, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Tenango del Valle, San Mateo Texalzacac, Tianguistenco, Toluca y Xonacatlán; Albores, 1995).



recursos y bienes por parte de particulares (con la formación de grandes haciendas) a través del despojo y compras forzadas de tierras²⁷ hasta el periodo porfiriano.

Con las reformas agrarias impulsadas por el presidente Lázaro Cárdenas que pretendió el rescate de lo comunal, se consolidó por una parte la estratificación económica de algunos municipios del Valle de Toluca, y que dieron pie al mismo tiempo, a la creación de políticas de desarrollo industrial (Albores, 1995).

3.2 Conformación de la Zona Metropolitana de Toluca

La Zona Metropolitana de Toluca (ZMT) fue configurada a partir de un centro, correspondiente a la Ciudad de Toluca, “*lugar donde está el dios Tolo o Tolotzin*”, fundada por el pueblo matlazinca²⁸ alrededor del año 640 D.C. (Estrada, 2003) y dominada por el pueblo azteca en 1473. A raíz de la conquista española, se nombró como “Toluca de San José” (1521), alcanzando el título de ciudad por parte del Rey Carlos IV (1799). Después de la independencia mexicana, se declaró Capital del Estado de México en 1830 (Alanís, 2013), recibiendo tiempo después el nombre de Toluca de Lerdo en honor a Miguel Lerdo de Tejada (1861).

Hasta el primer cuarto del siglo XX la relación de Toluca y otros municipios con la Ciudad de México fue de abastecimiento de alimentos (principalmente granos, carnes y lácteos), por lo que las actividades económicas del Valle de Toluca eran esencialmente primarias (Aranda, 2000), aunque existían industrias textiles, molinos, alfarerías y la famosa fábrica de cerveza “Victoria” (Liévanos y Villar, 2015).

²⁷ Las zonas más afectadas en el Valle de Toluca fueron Capulhuac, Atenco y San Mateo Atenco (Albores, 1995: 182).

²⁸ También llamados quaquatas o toluacas, siendo que el nombre *matlazincatl* proviene de *mátlatl* que significa red (uso para la pesca; Viesca *et al.*, 2011).



En el periodo comprendido entre 1929 y 1933 se dieron los primeros indicios de disposiciones legales para dar pie al proceso de industrialización, que dieron apertura a políticas impuestas en la siguiente década (Albores, 1995). A partir de 1940, el modelo de sustitución de importaciones²⁹ ocasionó un cambio drástico a la estructura de Toluca y de los municipios aledaños, debido a la implementación de planes y políticas a nivel estatal que ayudaron al desmantelamiento del sector agrario por el impulso al sector industrial (Tabla 8), dando pie a la conformación de la ZMT.

Tabla 8. Políticas, Planes y Leyes implementados para la conformación de la ZMT entre 1933 a 1990

Año	Política, Plan, Reglamento	Efecto
1929-1933	Ley de Protección de las Nuevas Industrias.	Reglamento que facilitó el comienzo de las industrias al Estado de México (Albores, 1995: 314).
1941	Programa de Fomento y Protección a las Industrias Nuevas y Necesarias	Impulsó la promoción de la llegada de industrias al Estado de México (Rendón y Godínez, 2016).
1942	Ley de Planificación del Estado	Da las bases para la planificación urbana del Estado de México (Gutiérrez, 2017).
1944	Ley de Protección a la Industria en el Estado Libre y Soberano de México	Tuvo por objetivo la ampliación de la productividad manufacturera. Se estableció un esquema de subsidios y facilidades para la llegada de empresas sin restricción alguna (en cuestiones geográficas). Aumentó la concentración de industrias en Toluca y Metepec (Rendón y Godínez, 2016).
1960-1990	Plan Maíz (1971)	Implantación de políticas agropecuarias que contribuyeron a desmantelar el aparato agrícola, permitiendo la migración de agricultores al sector industrial.
	Ley de Fomento Agropecuario (1980)	La política estatal dio seguridad a los grandes capitales agrarios contra expropiaciones para estimular la agricultura de exportación (semillas mejoradas y tecnificación), lo que ocasionó que la agricultura de temporal y de subsistencia casi se extinguiera, y aumentó la desigualdad social. Buscaba legalizar el arrendamiento de ejidos (Aranda, 2000)

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

²⁹ De acuerdo con Sandoval (1993) el modelo de sustitución de importaciones abarca tres etapas definitivas para la industrialización del Estado de México: 1) el impulso al sector agrícola y la exportación de alimentos (1940 a 1970); 2) el desmantelamiento del aparato primario y el fuerte impulso al sector industrial, para la generación de bienes de consumo del mercado interno (1970 a mediados de 1980); y 3) consolidación del sector secundario pero con la acumulación de capital, con una transnacionalización del mercado, y la búsqueda de la solvencia de bienes en las urbes. Grandes subsidios a la industria por parte del gobierno (1983 a 1993)



En 1941, se impulsó el desarrollo de la infraestructura vial entre las ciudades de Toluca y de México, para incentivar el movimiento de las industrias a la capital mexiquense (principalmente provenientes de la Ciudad de México) y dinamizar el flujo de mercancías entre los municipios aledaños. Se ejercieron, además, planes de expropiación de ejidos con el fin promover las facilidades necesarias para la llegada a las industrias (Iglesias, 2019).

En la década siguiente, la expansión industrial continuó en zonas que carecían de servicios básicos como drenaje, luz eléctrica, o pavimentación; y que el gobierno suplió intempestivamente sin una planificación del territorio y visión de largo plazo. Además, se intensificaron los beneficios gubernamentales con la excepción de pago de impuestos en los espacios previstos, lo que dio pie a la creación de los parques industriales de Toluca-Lerma, Toluca-Naucalpan y Toluca-Ixtlahuaca-Atlacomulco (Aranda, 2000).

Entre 1964-1968 se concretó el corredor industrial Toluca-Lerma, que se expandió hacia Metepec y San Mateo Atenco, promoviendo procesos de urbanización a través del cambio de uso de suelo de zonas ejidales a casas habitación e intensificando la construcción de ejes vehiculares de alta movilidad para el fácil desplazamiento de bienes y servicios con la región centro del país. Esta transformación decisiva en el oriente de Toluca impactó irreversiblemente a la ciudad de tres maneras: 1) comenzó su expansión, 2) se dieron las condiciones para una integración de los poblados periféricos que en ese momento eran rurales, y que al paso del tiempo se extendió hacia los municipios aledaños, y 3) se impulsó el desplazamiento y asentamiento de las actividades productivas hacia estos municipios (Liévanos y Villar, 2015).

La década de 1970 se caracterizó por la llegada de migrantes de la Ciudad de México y de consorcios comerciales ante el aumento de la demanda servicios en Toluca y Metepec, lo que generó un vínculo funcional entre ambos municipios (Aranda, 2000; Mejía *et al.*, 2018), conformando nuevas subcentralidades con una dinámica policéntrica de la zona metropolitana, aunque Toluca continuó siendo el centro más importante en cuestiones políticas, culturales y económicas (Liévanos y Villar, 2015).



Con la inercia del crecimiento urbano, en la década de 1980, la demanda de red de comunicaciones y transportes, así como el acceso a los servicios, alrededor de los municipios de Toluca, Lerma y Metepec se incrementó, integrando hacia el occidente al municipio de Zinacantepec (Aranda, 2005), convirtiéndose en un corredor comercial en su conexión con la capital mexiquense, “ciudad comercio orilla” (Iglesias, 2019).

Cabe destacar que el incremento de actividades terciarias entre Toluca y Metepec provocó que la migración proveniente de la Ciudad de México y otras regiones continuara y con ello, el aumento del empleo en este sector comercial, destacándose el fenómeno una especialización de las actividades, en Metepec (Aranda, 2000; Gordillo y Plassot, 2017). A partir de los años 90 se construyeron las primeras plazas comerciales y la lenta descentralización de las actividades económicas de Toluca, creando los nuevos subcentros terciarios, destacando Lerma y San Mateo Atenco (Liévanos y Villar 2015; Garrocho y Campos 2007).

Todo este fenómeno de urbanización se formalizó en el 2004 con la conformación de la Zona Metropolitana de Toluca (ZMT) a través de consensos efectuados por parte de la Secretaría de Desarrollo Social, el Instituto Nacional de Geografía e Informática y el Consejo Nacional de Población, establecieron los criterios para la conformación de las zonas metropolitanas de México (SEDATU, 2018).

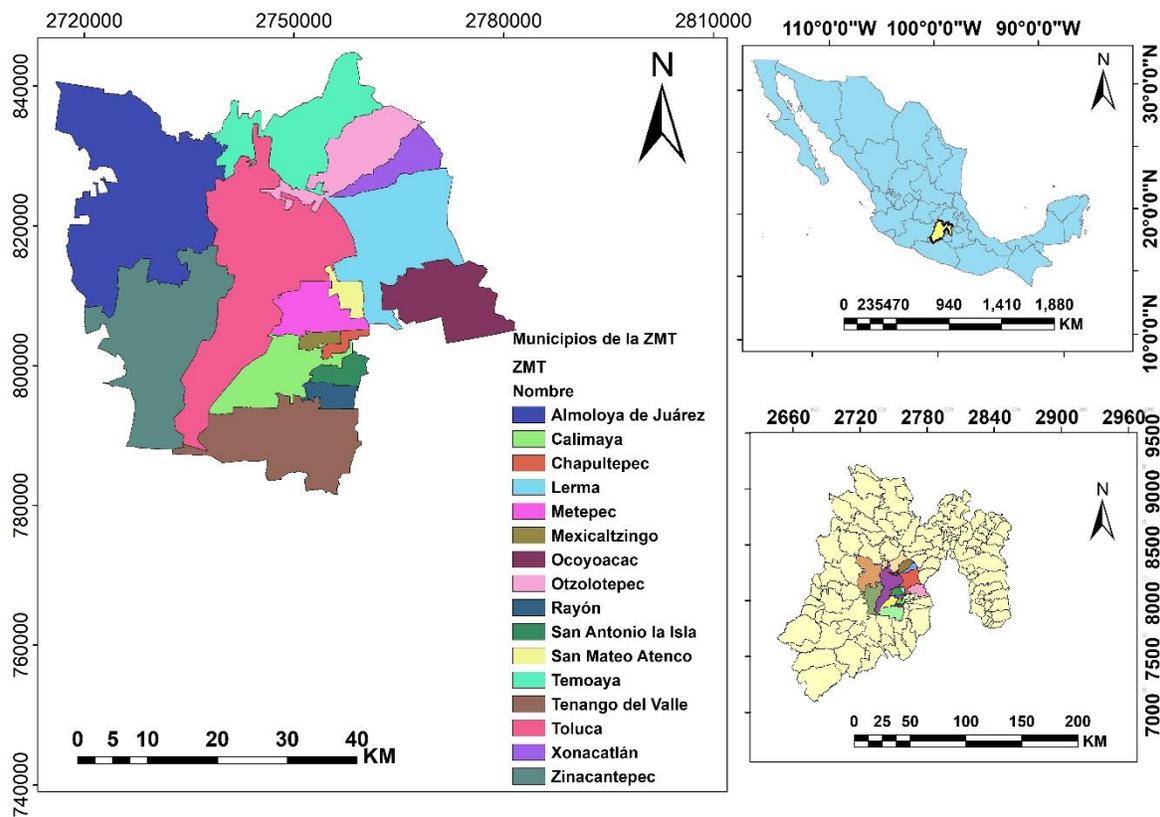
Es así, que desde 2015, quedó integrada por 16 municipios: (Figura 12): Almoloya de Juárez, Calimaya, Chapultepec, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Otzolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle, Toluca, Xonacatlán y Zinacantepec.

Hoy en día, los centros industriales están concentrados en Lerma, Toluca, San Mateo y Ocoyoacac; los de actividades comerciales primordialmente en Metepec y Toluca, aunque en cada municipio comienza a tener pequeñas plazas comerciales y centros de autoservicio, por lo que existe una fuerte tendencia a la terciarización.



Actualmente la ZMT se localiza en la zona centro de México, cuenta con una superficie de 2,410.5 km², con una población de 2,202,886 habitantes, que corresponde al 13.1% de la población total del Estado de México y tiene una tasa de crecimiento de 1.9% y una densidad urbana de 64.4 hab/ha (SEDATU, 2018)³⁰; siendo la quinta zona metropolitana más importante de México por sus actividades industriales y comerciales, que junto con la Zona Metropolitana del Valle de México aportan alrededor de una tercera parte del PIB nacional (Rendón y Godínez 2016).

Figura 12. Ubicación y conformación de la Zona Metropolitana de Toluca



Fuente: Elaboración propia del autor con base en el Marco Geoestadístico de INEGI (2018)

³⁰ Por cálculos propios, en el año 2000 era de 658.83 hab/km² y para 2018 era de 1110.22 hab/km²



3.3. Políticas de planeación de la ZMT

La conformación de la ZMT es el resultado de una serie de decisiones tomadas por el Estado a nivel federal e implementadas a nivel local. En este sentido, desde las primeras tres décadas del siglo pasado la perspectiva nacional de la Planeación Urbana se sostenía desde los preceptos de funcionalidad, orden, estética y salubridad pública pretendiendo que las ciudades mexicanas tuvieran un patrón de crecimiento armonioso y ordenado; reconociéndola además, como una ciencia que junto con la ingeniería y la arquitectura *“estudiaban desde diferentes perspectivas y enfoques, las funciones y comportamientos de la ciudad con el objeto de elevar los niveles de bienestar en paralelo con un sano y ordeñado desarrollo físico-espacial”* (Gutiérrez, 2009).

Fue hasta 1976 que a nivel federal sentaron las bases jurídicas para la planeación urbana mexicana con la creación de la Ley General de Asentamientos Humanos (LGAH), y se creó la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP), encargada de llevar a cabo todas aquellas acciones que se deberían ejercer en los tres niveles de gobierno en cuanto a la ordenación y regulación de los asentamientos humanos, buscando la calidad de vida acorde con el primera Conferencia Mundial de Hábitat (Hábitat I) de la ONU (Rebora, 1978) y ajustándose a los lineamientos establecidos por organismos internacionales para que México pudiera acceder a líneas de crédito (García, 2010). Marco normativo que no logró sus objetivos y su consolidación por: 1) el patrón de desarrollo y el proceso de industrialización basado en el modelo de sustitución de importaciones relegaron y truncaron dicho proyecto (Gutiérrez, 2009); 2) perspectiva federal que lamentablemente mantuvo una visión mecanicista, racional y centralizada en el Estado como único conductor de las políticas públicas en esta materia (Gutiérrez, 2014).

En el caso del Estado de México, en 1942 se promulgó en el Estado de México la Ley de Planificación del Estado, que se reflejó en la creación del Instituto de Acción Urbana e Integración Social (1969) buscando coordinar, las acciones de la ley federal y su implementación a nivel local (Gutiérrez, 2017); empero dicha perspectiva federal que



afectó a la entidad ya que limitó considerablemente la políticas regionales para resolver los problemas locales, sociales e incluso el aprovechamiento de recursos naturales. Es decir, estas políticas públicas provocaron buena parte de los problemas urbanos cuyas consecuencias se viven en la actualidad (Rebora, 1978); a manera de ejemplos se tienen: 1) la creación de la comisión de la cuenca del Lerma-Santiago en 1950 (Sánchez *et al.*, 2013) para llevar agua a la Ciudad de México; y 2) políticas públicas como el Plan Nacional de Desarrollo (1979) que determinaron conformar un clúster industrial que condicionó el crecimiento poblacional (a través de la migración) y lugares habitacionales en la ZMT, mientras se mantenían facilidades jurídicas y fiscales al sector secundario (Montoya, 1995). Decisión política que subordinó la regulación urbana a las fuerzas del mercado y los intereses del crecimiento, de tal forma que el “problema urbano” se vio como un “*mal necesario como precio del progreso*” (Rebora, 1978).

Ante esta lógica, se presentaron en los años ochenta contradicciones evidentes entre el marco jurídico y de planeación urbana dentro de la naciente ZMT, que determinaban, por un lado, la expansión de la industria y el comercio, el abordar sus efectos sobre el uso de suelo junto con la demanda de servicios; y por el otro, la concepción de centralidad de las ciudades y su funcionalidad a la región a la que se pertenecen (en este caso, a la Ciudad de México³¹, Montoya, 1995), ocasionando que cada municipio generara su propio plan de urbanismo; contradiciendo los ideales de Hábitat II (1996) y lo estipulado en el Sistema Nacional de Planes de Desarrollo (SEDESOL, 1996 en Gutiérrez, 2017; Montoya, 1995).

Esto fue a raíz de que la LGAH sufrió modificaciones (en 1981 y 1983) buscando ahora “*una distribución sustentable de la población y las actividades económicas*”, y de la búsqueda de crear planes territoriales, creando el Primer Plan Nacional de Desarrollo Urbano (Sánchez *et al.*, 2013), y de la Ley de Federal de Protección al Ambiente (1982). Con el informe Brundtland en 1987, se creó en 1966 la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), para añadir una política ambiental al desarrollo urbano, que aterrizó a los planes estatales y municipales.

³¹ El crecimiento acelerado de la Ciudad de México junto con las políticas gubernamentales antes mencionadas propició la migración de la industria a los lugares más cercanos: Toluca, Puebla, Pachuca (Aranda, 2000)



En este periodo, ya se consideraba la planeación territorial a nivel regional, por tanto, la ZMT era ya una zona metropolitana, pero no estaba definido concretamente sus límites. Fue entre 2001 y 2004 que se diseñaron las metodologías a escala regional, macro regional y estatal a través de la SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social creada en 1992) y el Instituto de Geografía de la UNAM, que se dieron los acuerdos para la elaboración de los Planes Estatales de Ordenamiento Territorial (Sánchez *et al.*, 2013). Hasta que en 2004 quedó conformada la ZMT y hasta en 2015 con los 16 municipios actuales

Es imperante señalar que la actual planeación urbana del Estado de México presenta profundas deficiencias normativas y metodológicas desde los lineamientos federales, que han impedido una buena conducción, transformación y orientación en las dinámicas urbanas locales, lo que ha afectado directamente a la ZMT. Esto se debe históricamente a los siguiente:

- 1.- Desde los años setenta, se diseñó un *Manual para la elaboración de Planes de Desarrollo Humano* que buscó homologar la metodología y planeación para todo el país, sin considerar las particularidades propias de cada poblado o ciudad (Gutiérrez, 2017).
- 2.- Entre los años ochenta y el inicio del nuevo siglo, las instituciones encargadas de llevar el desarrollo urbano fueron sustituidas constantemente, lo que debilitó paulatinamente las políticas de ordenamiento territorial y de urbanización, y que, ante la entrada del neoliberalismo, ya no pudieron hacer frente ante el acelerado crecimiento urbano (Iracheta, 2013) y considerando las modificaciones al artículo 27 constitucional que permitió la venta de propiedad ejidal
- 3.- En 2013 se aprobó la nueva Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano (LGAHOTD), donde el gobierno federal pretendió recuperar la gestión territorial, sin embargo, la misma ley no ofrece, por un lado, innovaciones sustanciales a lo que ya se arrastraba desde los años setenta y por otro, que la surgida Comisión Nacional de Vivienda dependiente de la Secretaría de Desarrollo



Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU³²), se encargara de una política encaminada a la construcción de vivienda. Esto provocó que los gobiernos locales se desvincularan de este ámbito y ocasionando el surgimiento de grandes zonas habitacionales alejadas de los centros urbanos y de los centros de trabajo de las personas (Gutiérrez, 2017), profundizando en un crecimiento desordenado y disperso, lo que ha ocasionado graves problemas de movilidad, seguridad, inclusión social, entre otros. Caso concreto de la ZMT.

- 4.- La innovación sobre nuevas políticas en planeación y ordenamiento urbano en a ZMT es casi nula, sin embargo, sí se hacen planes municipales y estatales de desarrollo, pero bajo los mismos lineamientos desde los años setenta No hay desde el punto de vista de Gutiérrez (2009), una modificación profunda a los lineamientos teóricos-metodológicos de la planeación urbana dejando ver una obsolescencia en mejoras urbanas de la ZMT, que solo han agudizado los problemas ambientales y sociales.
- 5.- A pesar de que México ha firmado y se ha comprometido con las políticas en cuestión urbana de la ONU, siendo la última Hábitat III, no ha cumplido con ello, quedando muy lejos aún del Objetivo 11 del Desarrollo Sustentable³³.

3.4. Problemas sociales y ambientales que enfrenta la ZMT desde su configuración

Desde su conformación, la ZMT presentó problemas de índole social y ambiental debido a la modificación del territorio y las dinámicas de sus habitantes, que en la actualidad se han acentuado; se enumeran algunos de ellos (Tabla 9):

³² La SEDATU sustituyó a la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) en 2013.

³³ El Objetivo 11 del Desarrollo Sustentable sostiene en lograr ciudades inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles.



Tabla 9. Problemas sociales y ambientales de la ZMT

Problema social o ambiental	Causas	Efectos
Suministro de agua	<ol style="list-style-type: none">1. Plan Lerma (1942-1951) donde el gobierno estatal permitió la captación agua de los manantiales de Almoloya del Río y de Lerma para ser enviada a la Ciudad de México (Aranda, 2000; Albores, 1995),2. Entre 1951 y 1960 se llevó a cabo la desecación de las ciénegas de Lerma, afectando principalmente a San Mateo Atenco entre (Albores, 1995).3. Comienzo de la extracción de agua de pozos.	<ol style="list-style-type: none">1. El suministro de agua comenzó a partir de entubar el agua.2. Creación de redes de drenaje hacia los cuerpos de agua superficiales. (Aranda, 2000).3. Falta de planeación en estas cuestiones.4. Actualmente hay sobreexplotación del Acuífero del Valle de Toluca, Contaminación de todos los cuerpos de agua por descargas industriales y domiciliarias. (Vilchis <i>et al.</i>, 2018; GEM, 2018; CONAGUA, 2012).
Cambio de uso de suelo	<p>Con la llegada de la industria y la conformación del corredor industrial Toluca-Lerma, se generó una migración de la población proveniente en su mayoría, de la Ciudad de México, concentrándose principalmente en Toluca y Metepec, haciendo del suelo un recurso indispensable para el acondicionamiento de casas habitación; consecuentemente se generaron conflictos por la invasión, ocupación ilegal, y en el mejor de los casos, la expropiación de ejidos sin indemnización a los propietarios.</p>	<ol style="list-style-type: none">1. El gobierno fue incapaz de proveer de los servicios básicos, ocasionando un crecimiento desordenado, disperso, poco controlado y con amplias deficiencias en la planificación de la ZMT (Aranda, 2000).2. Los habitantes de los municipios periféricos, caracterizados principalmente por su vocación agrícola, pasaron a ser la mano de obra en las industrias recién llegadas;3. Ruptura del tejido social junto con condiciones de vida tradicionales para pasar a ser parte de las dinámicas de la lógica del capital;4. Vulneración de la tenencia de la tierra5. Un crecimiento urbano anárquico, sin acceso a servicios y carente de planes de desarrollo urbano.



Movilidad	<ol style="list-style-type: none">1. La infraestructura urbana estuvo planeada en favor del uso del automóvil (característica del urbanismo latinoamericana)2. A partir de los sesenta, se comenzaron a gestar problemas de movilidad por dificultades en la disponibilidad de transporte público eficiente de los municipios periféricos hacia la centralidad (Toluca, Metepec y Lerma), que ya concentraban las principales fuentes de trabajo y el acceso a servicios básicos y de esparcimiento.	<ol style="list-style-type: none">1. Inicios del cambio de paradigma, del conocimiento y tradiciones ancestrales a la lógica capitalista.2. Rediseño de calles y avenidas, con demolición de casas y edificios históricos, para ampliar las vialidades para la movilidad urbana.3. Congestionamientos viales.4. Altos niveles de contaminación atmosféricas; siendo frecuentes las contingencias ambientales en la actualidad.
Incremento en la interconectividad con otras zonas metropolitanas-	Ante el aumento de las actividades económicas, en los años sesenta, se incrementó la interconectividad, por ello se ampliaron las carreteras o se construyeron nuevas, a través de la expropiación de tierras ejidales.	Conflictos sociales como el actual en la comunidad otomí de San Francisco Xochicuautla (municipio de Lerma), donde hasta la actualidad se ha buscado imponer sin éxito el trazo se una autopista hacia la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Leyva y Arriaga, 2019).
Diferenciación entre la centralidad y la Periferia.	A partir de la configuración de la centralidad (Toluca, Lerma y Metepec) por la especialización de las actividades económicas, las personas con la mayor capacidad económica se asentaron en ésta, y los trabajadores generalmente provenían de la periferia.	<ol style="list-style-type: none">1. Gentrificación.2. Asentamientos irregulares en la periferia de Toluca3. Incremento en el coste de la vida en la centralidad4. Incremento en el costo de desplazamiento de las personas de la periferia
Asentamientos irregulares	En la periferia de la Ciudad de Toluca se comenzó a invadir de manera irregular, por los llamados paracaídas	<ol style="list-style-type: none">1.- Incapacidad de proveer servicios básicos como electricidad y agua (Massé <i>et al.</i>, 2018)2.- Zonas de alta inseguridad
Configuración del imaginario mercantilista y consumista	Desde los años cincuenta el imaginario implantado en la ZMT está sustentado en el crecimiento ilimitado, en el consumismo y en la percepción de que la naturaleza debe estar al servicio del ser humano.	<ol style="list-style-type: none">1. Altos consumos de materiales y energía.2. Alta generación de entropía.
Políticas y Planes de urbanización con una visión determinista	Los marcos legales, las políticas y planes de urbanismo, además de la firma de convenios internacionales están sustentados en una visión que promueve la acumulación de capital, que beneficia a la banca y grandes industrias.	Los problemas ya mencionados.

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)



CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

En este capítulo detalla la metodología llevada a cabo para cuantificar el metabolismo urbano de la ZMT, atendiendo los preceptos teóricos y el contexto actual de dicha zona urbana³⁴.

En cuanto al Análisis de Flujo de Materiales y Energía (MEFA) se consideró las entradas y salidas de energía asociado con el consumo de energía eléctrica y combustibles fósiles. En cuanto a los materiales se analizó el consumo de agua, la producción de alimentos, los desechos producidos por éstos; y para comprender este contexto se tomaron en cuenta las actividades económicas y el número de vehículos, junto con la asociación de estos con las salidas, para dar un mayor entendimiento de este fenómeno urbano.

Se determinó también llevar a cabo un estudio estadístico basado en el Análisis por Componentes Principales (ACP) para obtener un índice metabólico, cuya finalidad fue comparar el metabolismo entre los municipios de la ZMT en el periodo de estudio. Cabe señalar que esto puede ser útil para comparar en estudios posteriores con otras entidades. Sin embargo, este índice se define en sus propias cifras, razón por la cual debe ser perfeccionado y validado en próximos estudios de éste y otros asentamientos urbanos, y con ello se considera como una propuesta metodológica para el estudio metabólico urbano.

³⁴ Las perspectivas teóricas están sustentadas en las ciencias de la complejidad y las ciencias híbridas. Se sabe que el metabolismo social, por ende, el urbano, es parte de la Economía Ecológica (Martínez Alier y Roca, 2013).



4.1 Modelo y selección de la información

Se determinó estudiar la Zona Metropolitana de Toluca -ZMT- debido al incremento considerable de los problemas ambientales y sociales que los pobladores de la zona han percibido desde el inicio de siglo hasta la fecha, definiendo un periodo de estudio comprendido entre el 2000 y 2017, el cual obedece a la disponibilidad y homogeneidad de la información obtenida a través de informes estadísticos estatales y nacionales que contemplan los parámetros básicos del MEFA³⁵.

Desde la perspectiva del metabolismo, de la complejidad y tomando en cuenta a las leyes de la termodinámica, se juzgó a la ZMT como una máquina térmica compuesta por 16 subcomponentes (municipios) con características y dinámicas propias, directa o indirectamente interrelacionadas, y que presentan un comportamiento dinámico de entradas y salidas de energía y materiales. Isomorfismo que depende sustancialmente de la validez de la información de los componentes a analizar; cuya disponibilidad exigió en algunos la extrapolación e interpolación; así mismo la comprobación de la veracidad de las cifras³⁶ (Figura 13).

Como entradas al sistema se determinó: 1) la **electricidad** proveniente de una Central Termoeléctrica de Michoacán, cuya distribución es para el sector Residencial (CTR) y los sectores Comercial e Industrial (CTCI), la sumatoria de ambos que corresponde al Consumo Total Eléctrico (CTE); 2) el **suministro de agua** proveniente del Sistema Cutzamala (que alimenta parcialmente a la ciudad de Toluca), el abastecimiento por medio de pozos profundos distribuidos en toda la zona de estudio y la precipitación pluvial; 3) el **consumo de combustible** para automóviles particulares (VP) y para vehículos de transporte público y de carga (VPC).

³⁵ El análisis de flujos de materiales y energía (MEFA) es una aproximación sistemática de los flujos de materiales y energía en un sistema definido, que generalmente se concentra sólo en el componente másico (Naohiro *et al.*, 2016) pero que, al considerar a la energía, se adquiere una mayor precisión en el estudio del fenómeno en cuestión.

³⁶ En cuanto a la metodología de la MEFA y considerando a la ZMT como un sistema abierto, la información se obtuvo de los Anuarios Estadísticos del Estado de México para los flujos de materia y energía.

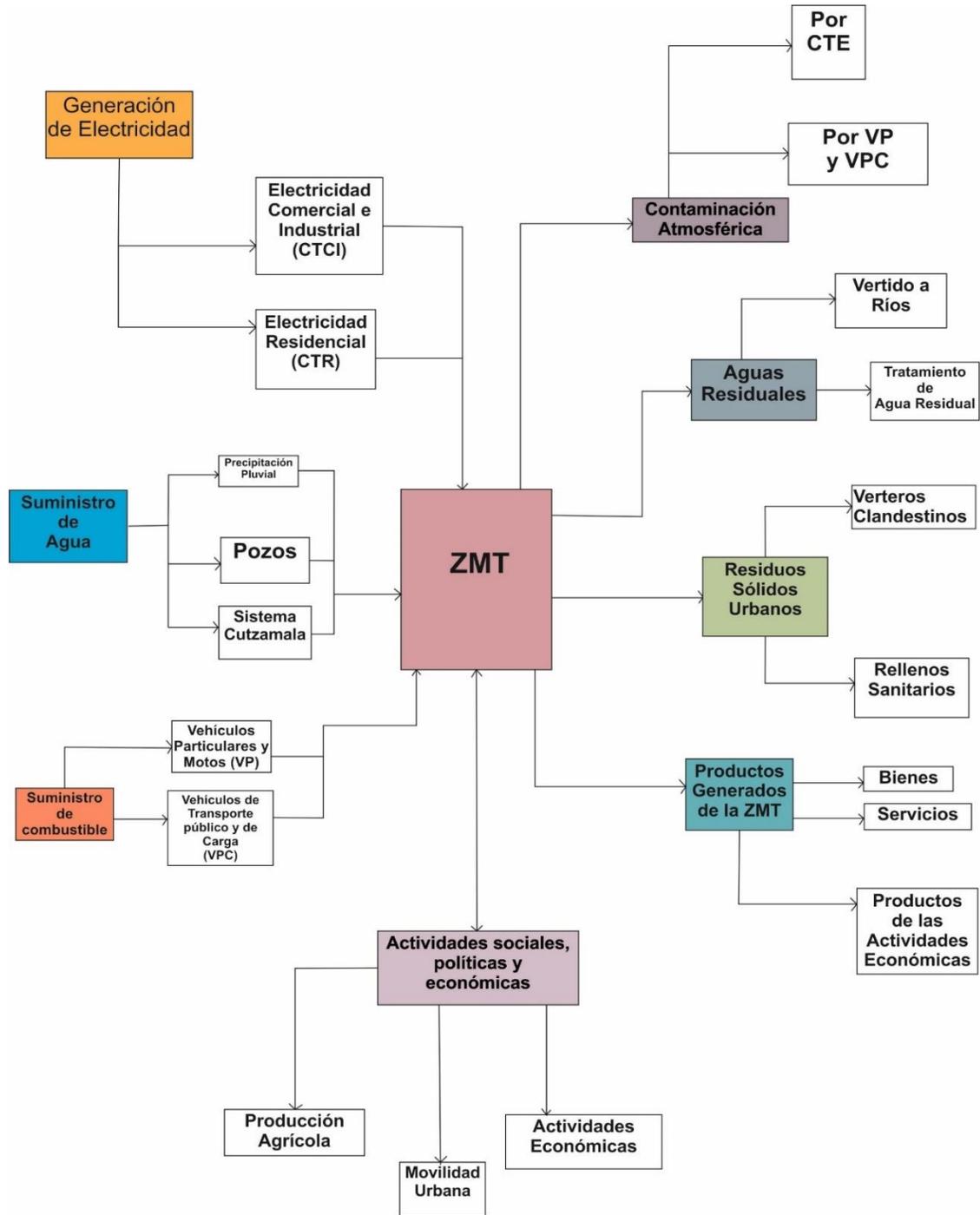


Adicionalmente se consideró: 1) **la producción de alimentos**, 2) las **actividades económicas secundarias y terciarias**; y 3) la disponibilidad de **vehículos privados y públicos** que circulan dentro y que determinan algunos movimientos de la zona de estudio. Las salidas incluyeron: 1) **la emisión de contaminantes atmosféricos** expresados en CO₂eq provenientes de los consumos de electricidad y de combustible, 2) el volumen de **agua residual**, y 3) de **residuos sólidos urbanos**.

Finalmente, se determinaron bajo el Análisis de Componentes Principales (ACP), índices metabólicos de cada subcomponente y por periodo de estudio, con el objetivo de definir el grado metabólico de cada uno y compararlos entre ellos, como propuesta metodológica, considerando que al obtenerlos es posible hacer estudios futuros con otros sistemas (ciudades). En la Figura 14 se muestra el proceso de elaboración de este trabajo.



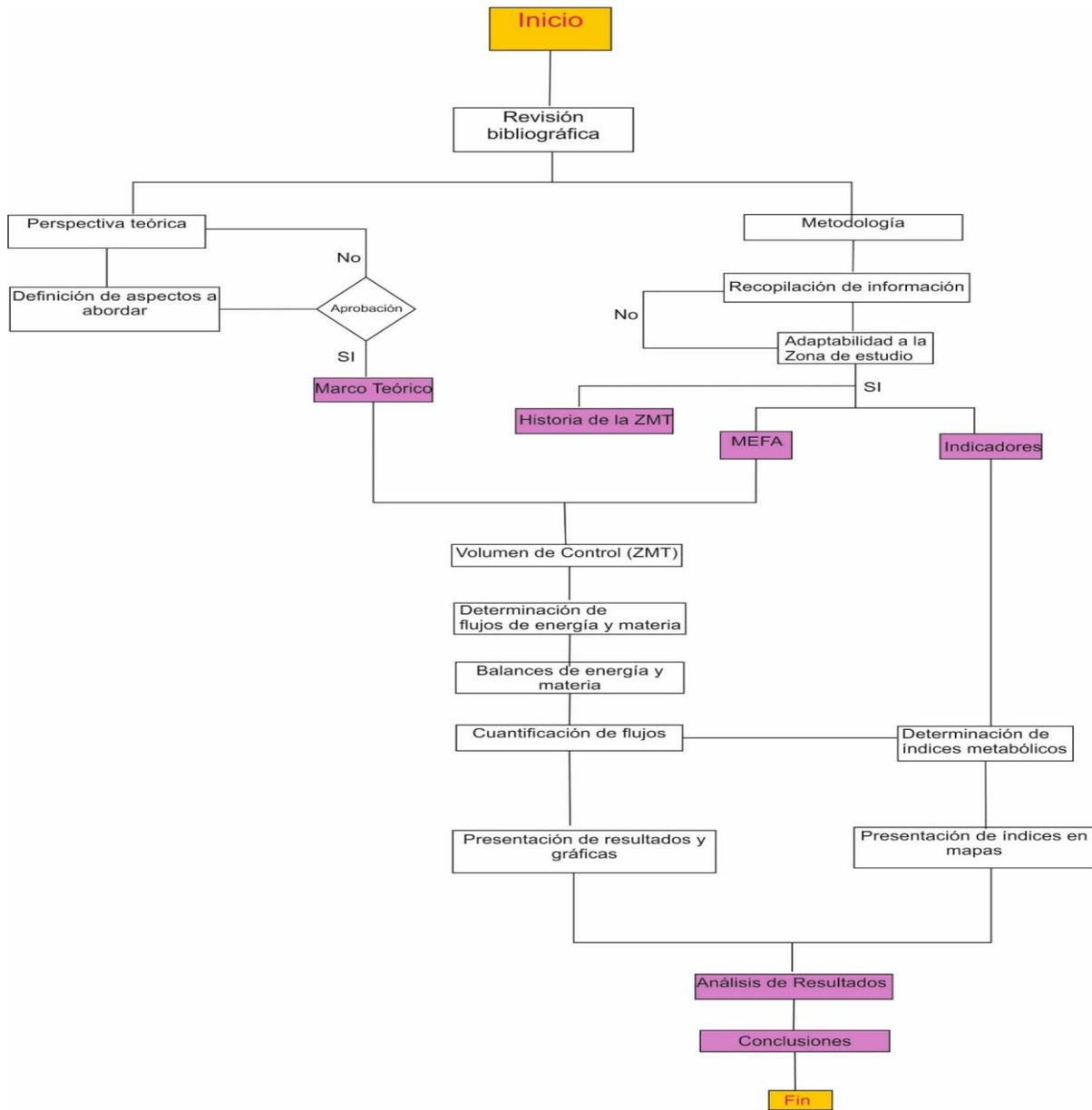
Figura 13. Flujos metabólicos de la ZMT



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)



Figura 14. Diagrama de elaboración del presente trabajo



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)



4.2 Cálculos para el análisis metabólico

Es preponderante precisar que las fuentes consultadas para la captación de información fueron primordialmente los Anuarios Estadísticos del Estado de México en el periodo comprendido entre 1999 y 2019, empero, se encontraron discrepancias entre la continuidad en el tiempo en algunos aspectos por ello fue necesario hacer estimaciones para completar los balances de materia y energía (Anexos 1 y 2). En el caso de las entradas, con base en la Figura 13 se estimaron factores de consumo de electricidad, de agua y combustible (Tabla 10)

Tabla 10. Formulaciones para determinar las entradas de la ZMT

Variable	Fórmula	Consideraciones	Fuente
Consumo de Electricidad	$CTE = CTR + CTCI$	CTE= Consumo Total de electricidad (MW/h, y J/año) CTR= Consumo Total Residencial (MW/h, y J/año) CTCI= Consumo Total de Comercio e Industria (MW/h, y J/año)	INEGI (2001 y 2017)
Consumo de Agua	$CA = \frac{Pob(hab) * CA \left(\frac{l}{hab * día} \right) * 365 días}{1000 \frac{l}{m^3}}$	A partir de datos de consumo de agua de 2010 se estimaron los correspondientes para 2000 y 2017 CA = Consumo de agua anual por municipio (m ³ /año) l = litros *Pob = población	Fórmula propuesta por los autores. INEGI (2010) *INEGI (2001 y 2017)
Distancia Recorrida por vehículo por año DRVA (km/año)	$DRVA = DMT * 2 vueltas * 7 días * 4 sem * 12 meses$	DMT = Distancia entre la cabecera municipal al centro Toluca (km/vuelta) Para VP se consideraron 2 vueltas Para VPC se consideraron 10 vueltas	Fórmula propuesta por los autores
*Factor de consumo estimado de combustible anual FCCA (l/año)	$FCCA = \frac{[% ciudad] * DRVA \left(\frac{km}{año} \right)}{Rendimiento en cd \left(\frac{km}{l} \right)}$	*% ciudad = Porcentaje de uso del automóvil en ciudad. Para este caso se consideró un 100% *Rendimiento en ciudad = Rendimiento de combustible promedio que tiene un automóvil en la ciudad (10 km/l)	*CONUEE (nd)
*Consumo de combustible VP y VPC (l/año)	$CCVP = FCCA * TVP$ $CCVPC = FCCA * TVPC$	**TVP: total vehículos que circulan en ZMT **TVPC: total de vehículos que circulan en ZMT	*CONUEE (nd). **INEGI (2001; 2020)

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)



Las dinámicas que se llevan a cabo dentro del entorno urbano dan cuenta del movimiento de los recursos en su interior, para lo cual los “balances físicos de comercio” son vitales porque expresan las entradas y salidas de todos los recursos que las ciudades requieren (Fischer-Kowalski *et al.*, 2011) y ayudan a explicar los consumos domésticos. En el caso de la ZMT las dinámicas a considerar se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Formulaciones para determinar las dinámicas de la ZMT

Variable	Fórmula	Consideraciones	Fuente
Producción Agrícola PA (Ton/año)	$Tasa\ ZMT = Prom(2003, 2005, 2010, 2017)$ $PM = \frac{Prod\ T\ ZMT\ 2000 * tasa\ por\ municipio}{100}$	Se calculó el valor para el año 2000. $Taza\ ZMT =$ promedio de producción por cada año (Ton/año) $PM =$ Producción por municipio (Ton/año) $Prod. T\ ZMT =$ Producción Total de la ZMT (Ton/año)	SIAP (2003, 2005, 2010 y 2017)
Producción Total Bruta (millones de pesos/año) de los sectores secundario y terciario	No existe, son datos directos		Censo Económico (1999, 2019) en INEGI

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Finalmente, las salidas que están relacionadas con la entropía (Rebane, 1995), y generadas a partir de los consumos hechos dentro del sistema, se expresan en la tabla 12 junto con su esquema de cálculo.



Tabla 12. Formulaciones para determinar las salidas de la ZMT

Variable	Fórmula	Consideraciones	Fuente
CO ₂ equivalente por electricidad (tonCO ₂ eq/año)	$ \text{ tonCO}_2\text{eq} = \text{factor} \left(\frac{\text{tonCO}_2\text{eq}}{\text{MWh}} \right) * \text{CTE} \left(\frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right)$	*CTR y CTCl **Factor para 2000: 0.6043 tonCO ₂ eq/MWh, ***Factor para 2015: 0.458 ton CO ₂ eq/MWh <i>Nota: Se consideró que producción de electricidad es por ciclo combinado.</i>	*INEGI (2000; 2017) **SEMARNA T (2010) **SEMARNA T (2016)
CO ₂ equivalente por consumo de combustible (tonCO ₂ eq/año)	$ \text{ tonCO}_2\text{eq} = \text{CCVP} \left(\frac{l}{\text{año}} \right) * \text{factor de emisión} \left(\frac{\text{KgCO}_2\text{eq}}{l} \right) * \frac{\text{ton}}{1000 \text{ kg}}$	*Factor de emisión: Gasolina premium: 2.229kgCO ₂ eq/l Diesel: 2.599 kgCO ₂ eq/l *Factores de emisión para convertir unidades: Gasolina premium: 77,473.46 kgCO ₂ eq/TJ Diesel: 73,385.6 kgCO ₂ eq/TJ *Poder calorífico: Gasolina premium: 44.5MJ/kg Diesel: 45MJ/kg *Densidad: Gasolina: 0.73 kg/l Diesel: 0.824 kg/l	*INECC (2014)
Volumen de Agua Residual (AR)		Datos obtenidos directamente de la fuente. Corresponde al Volumen de RSU que llegan a tiraderos o rellenos sanitarios	INEGI (2002; 2015)
Volumen de Residuos Sólidos Urbanos (RSU)		Datos obtenidos directamente de la fuente. Corresponde al Volumen de Agua Residual Vertido a Ríos o Arroyos de la localidad	INEGI (2003; 2011)

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Si bien el Principio de la Conservación de la Materia y la Energía, expresado en el balance de materia, señala que las todas entradas son iguales a las salidas más la materia acumulada; debido a cuestiones como: doble conteo, interdependencia de los flujos en aspectos económicos o el desglose de todos los sectores estudiados, externalidades y aspectos sociales que influyen en el metabolismo (Schandl, *et al.* 2002, en Browne *et al.* 2012), el balance no necesariamente, en la realidad del fenómeno urbano, se cumple a



cabalidad, más cuando, en este caso de estudio los datos recabados presentan algunos desfases en tiempo y se hicieron ajustes³⁷.

Para concluir esta parte del estudio, se calculó el Índice de Eficiencia Metabólica -IEM- (Browne *et al.* 2012), siendo la relación entre las emisiones totales (agua, combustible, es decir, salidas) y el consumo inicial (entradas) en el periodo de estudio, como parte del sistema termodinámico que es, a través de la ecuación 2³⁸:

$$IEM = \frac{\text{Emisiones totales por consumo}}{\text{consumo total}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Por otro lado, se determinó la correlación entre las actividades económicas, por medio del PB y el número de viviendas, con la generación de RSU, el agua consumida y residual y el número de vehículos; empleando un cruce de datos a través de una dispersión simple, utilizando el programa SPSS versión 25 y presentando los gráficos correspondientes.

4.3. Construcción de índices metabólicos

Una vez realizado el conteo de la información metabólica, se procedió a obtener los Índices³⁹ Metabólicos (IM), que se definen como el dato estadístico que pondera el balance metabólico (entradas, consumos y salidas) de cada subcomponente (municipio) de la ZMT en el periodo de estudio; tienen por objetivo establecer un criterio de los consumos de cada municipio, para que puedan ser comparados entre ellos, y con dicha base, puedan realizarse estudios futuros.

³⁷ Los datos considerados más actualizados fueron del padrón de vehículos (INEGI 2020).

³⁸ Desde el balance de materia, el número de entradas corresponde al número de salidas. Por tanto, si las entradas son mayores a las salidas, significa que hay acumulación en el sistema.

³⁹ Los índices son una “medida estadística que permite la comparación de una magnitud simple o compleja de dos situaciones diferentes con respecto al tiempo o espacio, tomando a una de ellas como referencia” (de la Fuente, nd).



Para tal fin se utilizó la metodología de Análisis de Componentes Principales (ACP)⁴⁰ bajo el software SPSS versión 2.5 (Anexo 3), cuyos valores obtenidos se determinaron como los Índices Metabólicos (IM); señalando enfáticamente que éstos no fueron homogéneos para los años de estudio, razón por la cual, para facilitar su interpretación se optó por utilizar la técnica de semaforización⁴¹ establecida por Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2013); creando cuatro rangos para los 16 municipios: a) **verde**, representando a aquellos municipios con un metabolismo bajo, b) **amarillo**, señalando las entidades con consumos medios bajos; c) **naranja**, para cuando el metabolismo es medio alto y d) **rojo**, si los municipios tienen altos o críticos consumos de materiales y energía, tal como se indica en la Tabla 13. Finalmente, se ranquearon (numeraron) los datos únicamente para señalar el lugar ocupado en el grupo de los 16 municipios que conforman la ZMT.

Tabla 13. Semáforo de Índices Metabólicos

Semáforo	Ranking	Valor del IM	Nombre	Interpretación
	0-4	1	Metabolismo bajo	Existe un consumo de recursos aparentemente bajo, y sus niveles de contaminación también son bajos
	4.1-8	2	Metabolismo bajo-medio	Existe un consumo moderado de recursos y sus niveles de contaminación se consideran bajos todavía
	8.1-12	3	Metabolismo medio	Los patrones de consumo son altos, pero no drásticos
	12.1-16	4	Metabolismo alto	Existe un metabolismo muy alto que indica altos niveles de consumo y contaminación.

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Finalmente, la semaforización establecida para su análisis espacial a través de ARC MAP 10.8 para hacer las respectivas comparaciones.

⁴⁰ El ACP es una técnica estadística multivariante de simplificación que permite transformar un grupo de variables correlacionadas entre sí, en un conjunto compacto de datos no correlacionados llamados factores o componentes principales. En este análisis se caracteriza por no existir jerarquías entre los valores iniciales, la eliminación de la información repetida, la independencia y linealidad de los nuevos datos con respecto a los originales.

⁴¹ Homogenización solo para los cálculos deterministas, no al estudio de la complejidad.



CAPÍTULO 5: METABOLISMO DE LA ZMT ENTRE 2000 Y 2017

En este capítulo se presenta el metabolismo urbano de la ZMT durante el periodo de estudio 2000 y 2017, en las dimensiones: hídrica, de materiales (que incluye la producción de alimentos y los residuos sólidos urbanos) y energética (consumo de electricidad y de combustible). Estos consumos y corrientes de desecho se comparan con otros datos de ciudades fuera y dentro de México con la finalidad de contrastar en consumo y establecer una posible línea base. Asimismo, se hizo una correlación de las actividades económicas y las salidas de la ZMT para evidenciar que el impacto de las acciones humanas en la generación de desechos.

Adicionalmente este trabajo propone el Índice Metabólico (IM) para señalar los niveles de consumo en cada subcomponente (municipio) de la máquina térmica compleja urbana, y facilitar la comparación en futuros estudios con otras ciudades o asentamientos humanos, asimismo como instrumento de políticas pública en la planeación urbana.

5.1 Metabolismo Hídrico de la ZMT

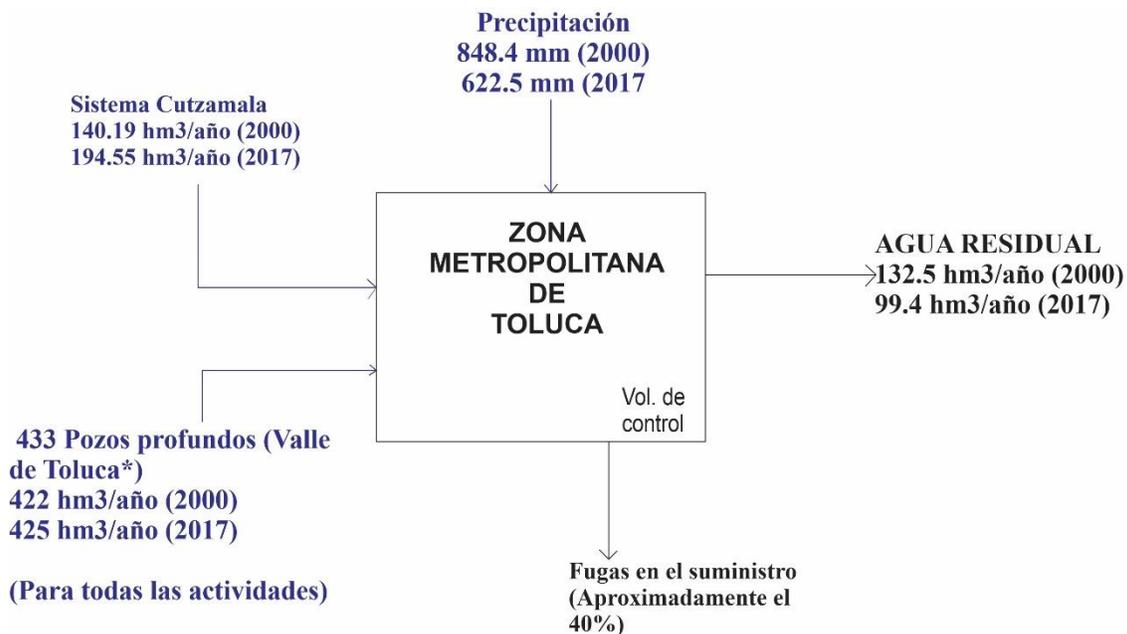
Los resultados del metabolismo hídrico en la ZMT evidencian un incremento en el consumo de agua, pasando de 140.19 hm³/año (2000) a 229.86 hm³/año (2017), presionando al sistema Cutzamala que suministra agua a los subsistemas de Toluca y Metepec (177.26 hm³/año en el 2000 a 194.55 hm³/año en 2017), y aumentando la extracción de agua subterránea en todos los municipios (422 hm³/año a 425 hm³/año)



reflejado en 433 pozos⁴²; diferencia de caudales que advierte un alto porcentaje de pérdidas técnicas en la red de distribución y las consecuencias del modelo de gobernanza de la región.

Por otro lado, la cantidad de precipitación pluvial disminuyó de 848.4 mm a 622.5 mm en el periodo de estudio (Tabla 14). A la par que la recarga del acuífero del Valle de Toluca sufre de estrés hídrico con recarga de 336.51 hm³/año, mientras que su extracción es de 425 hm³/año, con un balance negativo de -142.17 hm³/año (GEM, 2018), poniendo en alta vulnerabilidad a la ZMT, pues de acuerdo con Bastida (2016) es su principal sustento, pues las aguas superficiales están contaminadas o han desaparecido⁴³ (Figura 15).

Figura 15. Balance de agua de la ZMT (2000 y 2017)



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

⁴² Este dato de pozos es del acuífero del Valle de Toluca abarca 23 municipios incluyendo los 16 de la ZMT (GEM, 2018).

⁴³ Es importante mencionar que las aguas superficiales han decaído en un 7.03% pasando de 3,199.21 ha a 2,974.43 ha entre 1984 y 2018. (Adame *et al.*, 2020).



Esto mostró que hay una disminución en la disponibilidad de agua de manera natural y la entrada de agua del ciclo urbano aumenta, esto señala que la ZMT presenta una alta vulnerabilidad hídrica y esto no es sostenible en el tiempo.

Tabla 14. Metabolismo hídrico de la ZMT entre 2000 y 2017

ZMT/Año	Sistema Cutzamala (hm ³ /año)	Precipitación pluvial (mm)	Extracción subterránea (hm ³ /año)	Consumo agua (hm ³ /año)	Consumo per cápita (l/hab. día)	Vol. Agua residual (hm ³ /Año)	Tasa per cápita (l/hab. día) 2010	Índice de Eficiencia
2000	**177.26	848.4	422	140.19	239.2	132.5	226.2	0.9
2016	***194.55	*622.5	***425	229.86	232.8	99.4	100.7	0.4

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: * Dato correspondiente a 2007. Datos de Precipitación Pluvial, obtenidos de: Juan (2010)

** Dato correspondiente a 2005. Fuente: GEM (2018)

***Dato correspondiente a 2017. Fuente: GEM (2018)

Ahora bien, en cuanto al análisis por municipio, los mayores consumos corresponden a Toluca (63.75 hm³/año a 96.70 hm³/año), Metepec (23.35 hm³/año a 31.53 hm³/año), Lerma (10.46 hm³/año a 18.59 hm³/año) y Almoloya de Juárez (7.87 hm³/año a 18.31 hm³/año) (Figura 16; Anexo 4), que en la ruralidad dependen principalmente de pozo, mientras que en el casco urbano el suministro lo respalda el Sistema Cutzamala.

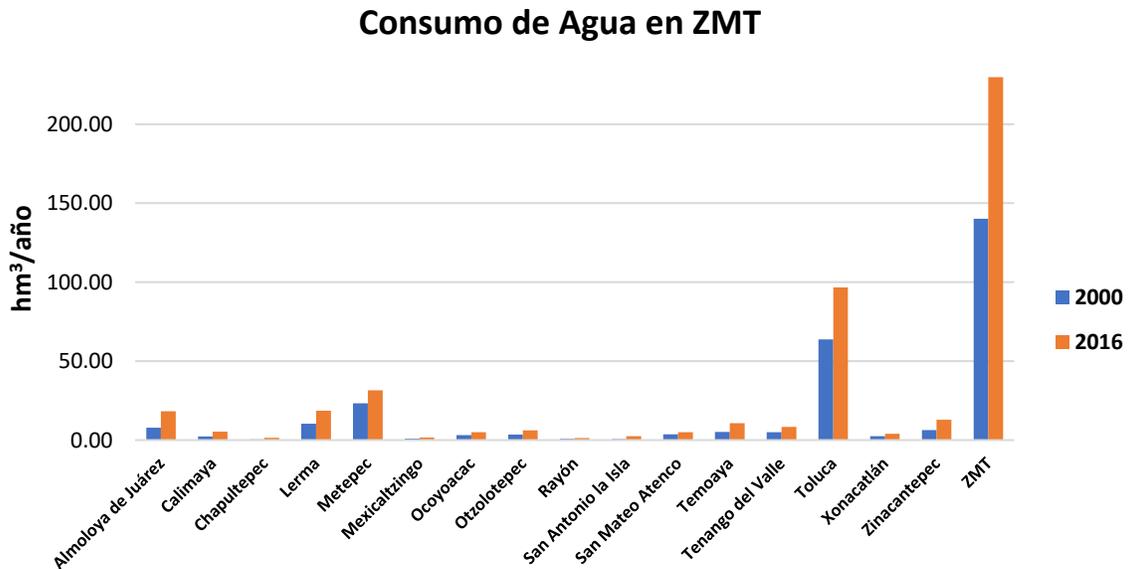
Cabe señalar que desde que se determinó el Decreto de Veda, en 1965, se tiene por entendido que no hay permisos para abrir pozos para su explotación, y en caso de otorgar alguno, se tiene que consumir una cantidad igual o menor a la concedida. Sin embargo, de acuerdo con Bastida (2016) existe un “mercado negro” de concesiones donde se permiten explotaciones principalmente a industrias y grandes comercios superiores a 3 millones de m³ al año (3 hm³/año), por lo que se estima que en el acuífero existen alrededor de 2000 pozos sin ningún control.

Ante esta sobreexplotación, la subsidencia entre 1968 y 2011 en la zona centro y cerca de la zona industrial (norte) en el municipio de Toluca ha alcanzado más de 50 m, de igual manera se presenta este fenómeno en Metepec y Zinacantepec, que ha sido de 8m (entre 2006 y 2011); mientras que, en las periferias de Lerma, el hundimiento es de 30 m y descende hacia zona norte, en los municipios de Temoaya, Xonacatlán y Oztolotepec



(Esquivel *et al.*, 2015). Además, se han perdido manantiales sobre todo en la parte norte de la Sierra de las Cruces y de Santa María Atarasquillo (Bastida, 2016).

Figura 16. Consumo de agua por municipio de la ZMT



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: 1 hectómetro cúbico equivale a 1 millón m³.

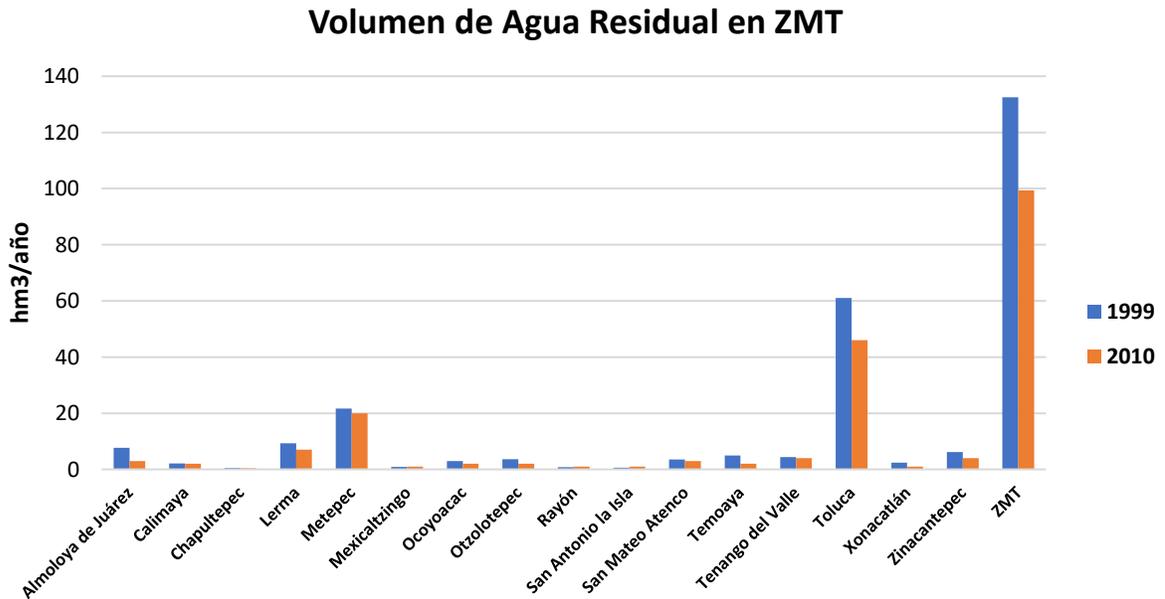
Por otro lado, con el crecimiento de asentamientos irregulares en la periferia y lotes urbanos en la ciudad de Toluca, se está reduciendo el indicador de cobertura de servicios públicos domiciliarios básicos, entre ellos, el acceso al agua. Massé *et al.*, (2018) señalan que para el año 2010 la continuidad de la prestación del servicio de agua en esta ciudad era del 64%, siendo que el 21.61% de la población disponía del vital líquido cada tres días, el 10.5% una o dos veces por semanas y el 3.73% tienen acceso al vital líquido en ocasiones. A esto hay que agregar que las fugas de agua por suministro corresponden aproximadamente al 40% del ministro total (Velázquez, 2021; GEM, 2018)

En cuanto al drenaje urbano, el comportamiento es similar ya que no se alcanzan coberturas del 100% y el agua no es tratada en todos los casos (GEM, 2018). La figura 17 muestra la cantidad de aguas residuales vertidas principalmente a ríos, barrancas o lagos cercanos en



las localidades. Destaca que Toluca presenta una disminución en las aguas vertidas a ríos (61.03 hm³/año a 46 hm³/año), al igual que Metepec (21.65 hm³/año a 20 hm³/año) y Lerma (9.31 hm³/año a 7 hm³/año). En este sentido el Río Verdiguél, que atraviesa la capital mexiquense y que era una de las mayores fuentes de abastecimiento, fue entubado en 1968 para transportar aguas residuales que llegan al Río Lerma (Agua y Saneamiento de Toluca, 2019). Además, este río recibe gran cantidad de desechos diariamente descargas industriales y domésticas, lo que lo hace, el río más contaminado del país (CONAGUA, 2012).

Figura 17. Aguas residuales per cápita en la ZMT



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: Datos completos en el Anexo 4.

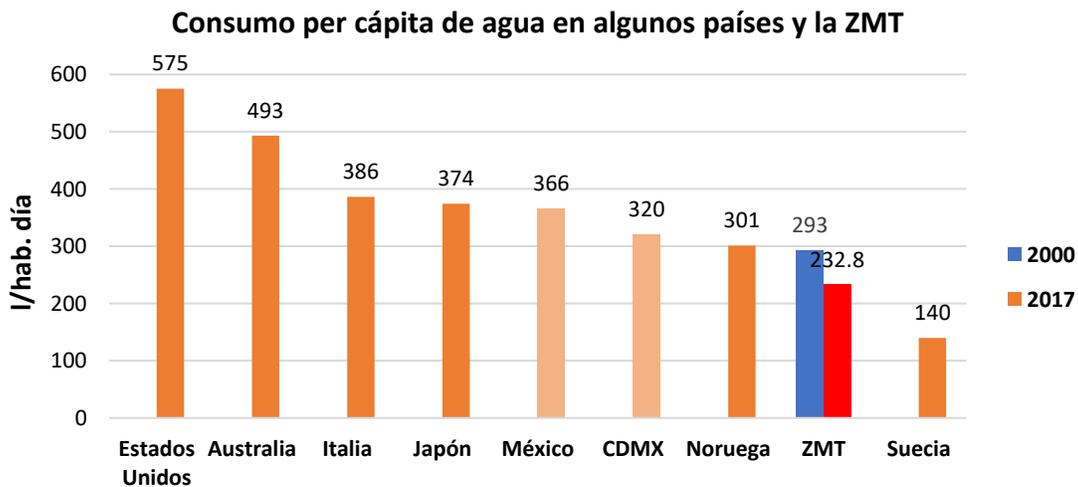
Esta problemática evidencia tres aspectos señalados en la tabla 12: 1) un aparente reducción en el volumen de aguas residuales vertidas, pasando de 132.5 hm³/año a 99.4 hm³/año, sin embargo, este último valor no refleja la realidad debido al gran número de descargas furtivas a cuerpos de agua superficiales; 2) el consumo de agua per cápita también se reduce de 239.2 l/hab.día a 232.8 l/hab.día, advirtiendo una disminución en el acceso al agua y posibles conflictos por uso, lo que evidencia un problema de planeación urbana y



crecimiento poblacional (Adame *et al.*, 2020); 3) la eficiencia hidráulica del sistema decreció de 0.9 a 0.4, dando evidencia de la reducción de los inventarios formales de aguas residuales y con ello el incremento de descargas clandestinas; este indicador no refleja un uso eficiente de los recursos o del metabolismo hídrico, sino una búsqueda “rápida y fácil” de salidas de agua por el mal diseño de la estructura de la ZMT⁴⁴.

Al comparar el consumo per cápita de ZMT con otras economías (Figura 18), se observa un menor gasto al de la Ciudad de México -CDMX (320 l/hab. día) en el 2017, similar al promedio nacional de Noruega (301 l/hab. día) y por encima de Suecia (140 l/hab. día); países cuya población⁴⁵ (Banco Mundial, 2022). es muy superior a la de la ZMT reflejando comportamientos suntuarios y posible ineficiencia en el uso del recurso.

Figura 18. Consumo per cápita de agua en algunos países contra la ZMT



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: La fuente para Suecia fue: iAgua (2022)

Los datos del resto de los países fueron obtenidos de ONU HABITAT (2021), se muestran en el Anexo 6.

⁴⁴ Utilizando el concepto de eficiencia de agua, salidas sobre entradas, los valores obtenidos en este trabajo muestran que las primeras son menores a las segundas (99.40 hm³/año sobre 229.86 hm³/año). Tomando en cuenta esto, se señalaría que agua residual se acumularía dentro de la ZMT, siendo esto imposible, razón por la cual la eficiencia es menor. Es por ello, la presencia de salidas ilegales, no registradas y no reguladas. Consecuentemente, que este dato, se debe considerar únicamente desde el punto de vista de la ingeniería sanitaria e hidráulica, razón por la que no explica la crisis de agua que persiste en la ZMT.

⁴⁵ Población de Noruega 10,353,44 hab.; Suecia 5,379,48 hab. y la ZMT 2,705,593 hab. en 2017.



La pérdida del recurso hídrico en la ZMT va más allá de las cifras, del agotamiento del acuífero, su contaminación por mineralización, materia fecal y desechos industriales (Tabla 15) ya que desde lo intangible se ha presentado una pérdida de identidad cultural de los habitantes de las áreas lacustres (Lerma, San Mateo Atenco) y riverieñas del Lerma, que antiguamente se dedicaban a la pesca, que al desecarlas y contaminarlas, cambiaron su modo de vida a la agricultura y/o han sido forzados a emplearse en las industrias textiles o zapateras (Bastida, 2016, Albores, 1995).

Se prevé a futuro que el problema en la ZMT persista, ya que el país no cuenta con una política hídrica integral ni un marco jurídico adecuado. Tampoco goza de una cultura de participación social activa ni la credibilidad en la institucionalidad para hacerlo. La débil gobernanza y la fragmentada gobernabilidad del agua propicia un ciclo vicioso de corrupción, de poco control y de desigualdad social (Martínez-Austria *et al.*, 2019).

Aunado a todo lo anterior, se debe considerar que desde la Colonia el agua es percibida como un recurso cuya prioridad es la explotación no la vida (Arrojo, 2006), lo que culturalmente se refleja en consumos desmedidos, desperdicios e imaginarios de agua como bien privado; más cuando al declararse como derecho humano (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 1917; Arrojo, 2006), se abusa por no pago ante la imposibilidad del prestador del servicio de cortar el suministro. Además, está el problema técnico de cobro por macro medición y/o agua en bloque, reflejada en tarifas únicas anuales.

La gestión ineficiente del agua, la escasa regulación y la “incultura” del cuidado de ésta, permiten concluir que la ZMT no cumple con el ODS 6 ni con el con el programa HABITAT III (Gutiérrez, 2017).

Tabla 15. Principales contaminantes presentes en el agua del Río Lerma



Los municipios que abarcan el Valle de Toluca descargan sus aguas residuales provenientes de fuentes domésticas e industriales, teniendo como destino final al Río Lerma, a través de diversos medios: 35% de las descargas van a ríos y arroyos, el 31% corresponden a canales de aguas negras, 27% pertenece a campos, pozos de absorción y filtraciones que van al subsuelo y el 7% es por medio de colectores (Carreño, *et al.*, 2018).

Hasta 2010 el gobierno del Estado de México tenía registradas 375 descargas de procedencia industrial y efluentes de más de 700 empresas, siendo principalmente de la zona industrial de Toluca, los parques industriales: Toluca 2000, Lerma, El Coecillo, de Santiago Tianguistengo, Ocoyoacac, Ixtlahuaca y Atlacomulco (CONAGUA, ND).

Por tanto, tomando en cuenta la procedencia de las aguas residuales, los sedimentos del Río Lerma en sus distintos afluentes presentan los siguientes parámetros fisicoquímicos: 1) PH básico entre 8.15 y 8.21; 2) COT entre 0.8% y 16.2%; 3) metales como Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb; 4) compuestos orgánicos aromáticos policíclicos y bifenilos policlorados; 5) Compuestos Aromáticos Volátiles (COVs), herbicidas, hidrocarburos poliaromáticos, tolueno, xilenos, halógenos orgánicos absorbibles y carbono orgánico (Carreño *et al.*, 2018; CONAGUA, ND).

Asimismo, en la parte alta de la cuenca del río, 22 sitios (de Almoloya del Río hasta la parte norte del Valle de Toluca), presentan contaminación microbiológica por coliformes fecales y *Escherichia coli*, bajas concentraciones de oxígeno disuelto y/o alta toxicidad, a pesar de que existen 6 plantas de tratamiento de aguas, de las que destaca RECLICLAGUA, que trabaja con aguas industriales, las macro plantas Toluca-Norte y Toluca Oriente, que tratan aguas municipales (CONAGUA, ND).

Estas plantas de tratamiento no son suficientes para el volumen de agua residual que se genera diariamente, además que no alcanzan a cubrir a todas las industrias, siendo que el agua tratada se vierte y contamina nuevamente al Río Lerma. Hay que agregar que, en todo el cauce del río, las diversas ciudades o poblados desechan sus residuos donde en Jalisco y Nayarit, los niveles de contaminación son tan altos que se han presentado muertes por problemas renales e incluso cáncer (Álvarez, 2021).

Para dar cuenta de lo anterior, de acuerdo con datos del GEM (2018), el volumen estimado de aguas residuales asciende a 1,108.52 millones de m³/año, de los cuales, se colectan 236.17 millones de m³/año, dando un tratamiento de únicamente a 6.4m³/s en toda la entidad, lo equivalente a 12, 109.8 millones de m³/año.

Es por ello, que el Río Lerma es un cuerpo de agua considerado como muerto pues la demanda química y bioquímica de oxígeno y por los componentes sumamente tóxicos que desplaza (Álvarez, 2021), ya no es posible la vida a sus alrededores y los efectos que tiene en el medio circundantes son un riesgo para la salud.

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

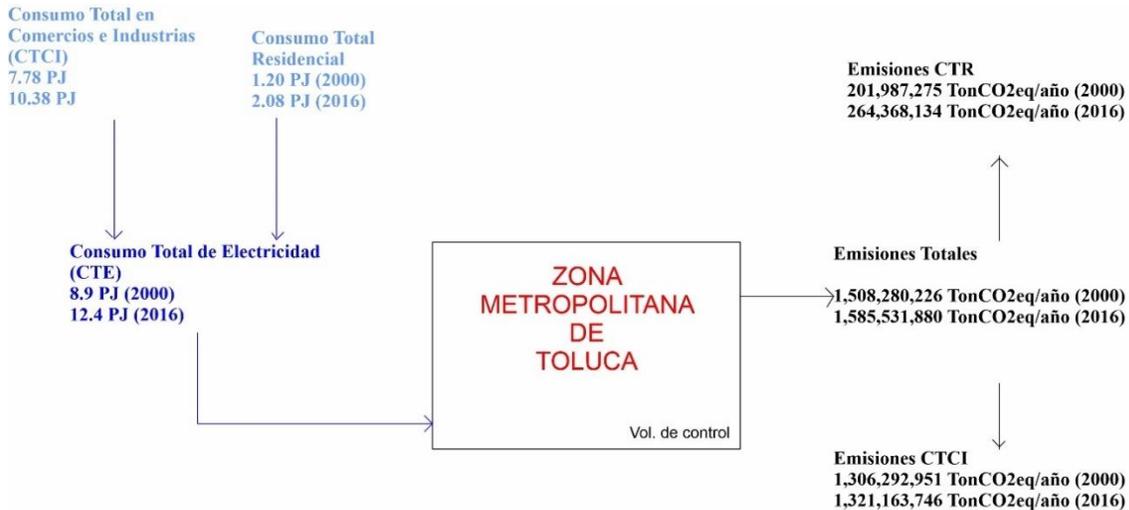
5.2. Metabolismo del consumo de electricidad

El metabolismo en el consumo de electricidad está expresado en la Figura 19. El incremento en el consumo de electricidad en la ZMT es innegable, pasó de 8.9 PJ a 12.4 PJ en el Consumo Total Electricidad -CTE. Este aumento también se manifestó en el Consumo



Total de Residencias -CTR (1.20 PJ a 2.08 PJ) y Consumo Total de Comercios e Industrias-CTCI (7.78 PJ a 10.38 PJ) tal como se expresa en la Tabla 16.

Figura 19. Balance del Consumo de Electricidad de la ZMT



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Tabla 16. Metabolismo por consumo de electricidad de la ZMT

ZMT/Año	Población (2000)	CTE KWh/año	CTR (PJ)	CTCI (PJ)	CTE (PJ)	CTE per cápita (KWh/hab. año)	CTE/hab (MJ/hab. año)
2000	1,605,571	2,495,913,000	1.20	7.78	8.9	1,554.5	55.96
2016	2,705,593	3,461,860,000	2.08	10.38	12.4	1,279.5	46.06

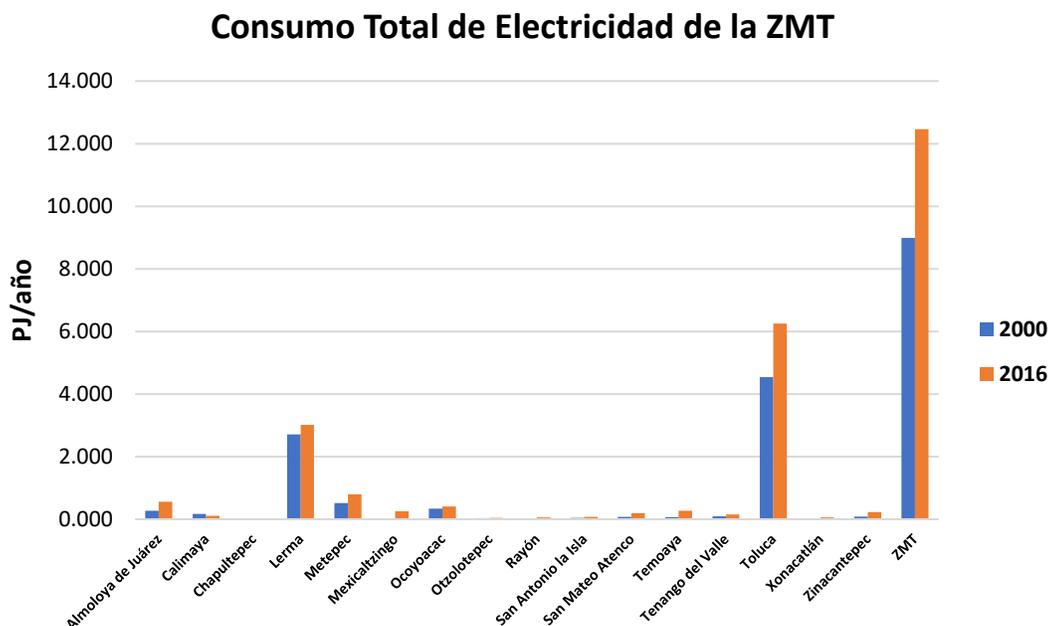
Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

El consumo en el sector doméstico casi se duplicó, mientras que en el sector comercial e industrial su crecimiento fue del 28% (Figura 19). En la Figura 20 se muestra que todos los municipios de la ZMT incrementaron su consumo bruto, destacándose Toluca (4.54 PJ y 6.25 PJ), Lerma (2.71 PJ y 3.013 PJ), Metepec (0.516 PJ y 0.793 PJ) y Almoloya de Juárez (0.273 PJ y 0.555 PJ). Recordando que Lerma concentra la mayor cantidad de industrias y que en la capital mexiquense es el centro político-administrativo no sólo de la zona de estudio sino del Estado de México, y Metepec concentra la mayor cantidad de actividades terciarias.



Cabe destacar que el consumo per cápita en el CTE disminuyó, pasando de 55.96 MJ/hab. año a 46.06 MJ/hab. año. De acuerdo con la figura 20, dónde Lerma fue el municipio que más redujo su consumo (271.3 MJ/hab. año a 169.8 MJ/hab. año), seguido de Ocoyoacac (68 MJ/hab. año a 52 MJ/hab. año) y Toluca (68.1 MJ/hab. año a 61.8 MJ/hab. año). En contraste, los municipios periféricos que incrementaron sus consumos fueron: Mexicaltzingo (14.7 MJ/hab. año a 159.9 MJ/hab. año), Rayón (5.4 MJ/hab. año a 40.3 MJ/hab. año), Temoaya (10.1 MJ/hab. año a 18.8 MJ/hab. año) y San Mateo Atenco (12.1 MJ/hab. año a 22.9 MJ/hab. año) (Anexo 5).

Figura 20. Consumo Total de Electricidad de la ZMT



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: Los datos completos están en el Anexo 5.

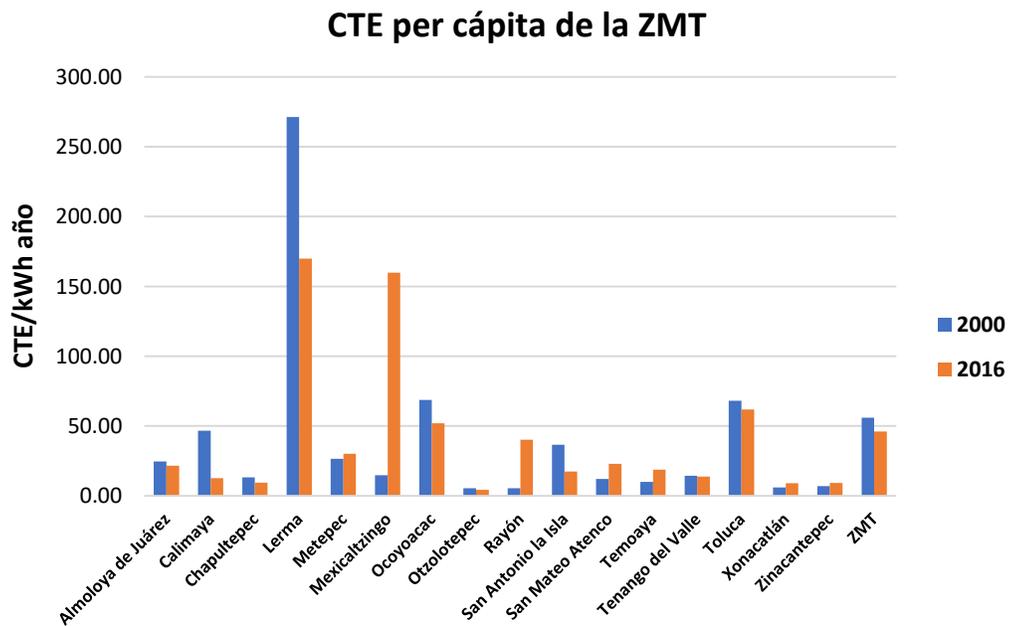
El consumo agregado de energía se incrementó debido al aumento de zonas habitacionales de los municipios periféricos (Mexicaltzingo, Rayón, Chapultepec, Calimaya, San Antonio la Isla, Tenango del Valle, García *et al.*, 2015) que se han convertido en sitios dormitorio principalmente de (Toluca, Metepec, Lerma).



Por su parte, la reducción del consumo bruto per cápita radica (Figura 21) en que hay una inequidad en el acceso en el consumo de electricidad por hacinamiento, donde el Estado de México ocupa la novena posición a nivel nacional (Huerta, 2017), teniendo la ZMT aproximadamente el 30.5% de las viviendas este problema (GEM, 2015) extendiéndose este problema en los municipios periféricos e incluso las poblaciones en la capital mexiquense que están alejados de la ciudad⁴⁶.

La reducción del consumo per cápita también obedece a la variable precio kWh; toda vez que hay población que no tiene capacidad de pago y por ende reduce el consumo. En muchos casos, la población prefiere tener agua o gas en lugar de luz eléctrica (Ortíz *et al.*, 2017).

Figura 21. Consumo per cápita de electricidad de la ZMT



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: Los datos completos están en el Anexo 5.

⁴⁶ Datos de densidad poblacional calculados para este trabajo en el periodo de estudio: Almoloya de Juárez, 228.5 hab/km² y 531 hab/km²; Calimaya: 344 hab/km² y 819 hab/km²; Chapultepec: 454 hab/km² y 1,408.5 hab/km²; Lerma: 436.8 hab/km² y 776.3 hab/km²; Meteppec: 2,761 hab/km² y 3,728 hab/km²; Mexicaltzingo: 807.7 hab/km² y 1,368.21 hab/m²; Ocoyoacac: 368 hab/km² y 574.7 hab/km²; Otzolotepec: 493.4 hab/km² y 865.4 hab/m²; Rayón: 438 hab/km² y 705.7 hab/km²; San Antonio la Isla: 558.7 hab/km² y 2275 hab/km²; San Mateo Atenco: 4,741 hab/km² y 6,583 hab/km²; Temoaya: 364 hab/km² y 745 hab/km²; Tenango del Valle: 313.8 hab/km² y 523 hab/km²; Toluca 1,473 hab/km² y 2,235 hab/km²; Xonacatlán: 628 hab/km² y 998 hab/km² y Zinacantepec: 394 hab/km² y 796 hab/km².



En cuanto a las emisiones de CO₂ eq., es importante señalar que la energía eléctrica que se suministra para la ZMT proviene de una central carboeléctrica ubicada en el estado de Michoacán (Gobierno de México, 2019; SENER, 2019), cuya eficiencia promedio oscila entre el 35 y 40 % (Lugo *et al.*, 2009), condición que fue tomada en cuenta para el cálculo de las emisiones de CO₂eq. asociado a consumo de energía eléctrica (Alcance 2 para el cálculo de huella de carbono; Schneider y Samaniego, 2010).

Con respecto a los datos de la ZMT, se evidencia en la Tabla 17, que la cantidad de emisiones de CO₂ eq. se incrementó en el periodo de estudio en un 5.12%, equivalente a 1,508,208,226 TonCO₂eq en el año 2000 a 1,585,531,880 TonCO₂eq en 2016, siendo el CTR, emitiendo 62,380,859 tonCO₂eq más que el CTCI en 2016.

Tabla 17. Emisiones de CO₂ eq. por CTE de la ZMT

ZMT	Población (2000)	Emisiones CTR (TonCO ₂ eq/año)	Emisiones CTCI (TonCO ₂ eq/año)	Emisiones totales (TonCO ₂ eq/año)	Emisiones CTE/hab (TonCO ₂ eq/año hab)	Incremento en el periodo de estudio
2000	1,605,571	201,987,275	1,306,292,951	1,508,280,226	939.40	
2016	2,705,593	264,368,134	1,321,163,746	1,585,531,880	586.02	5.12%

Fuente: elaboración propia del autor (2022)

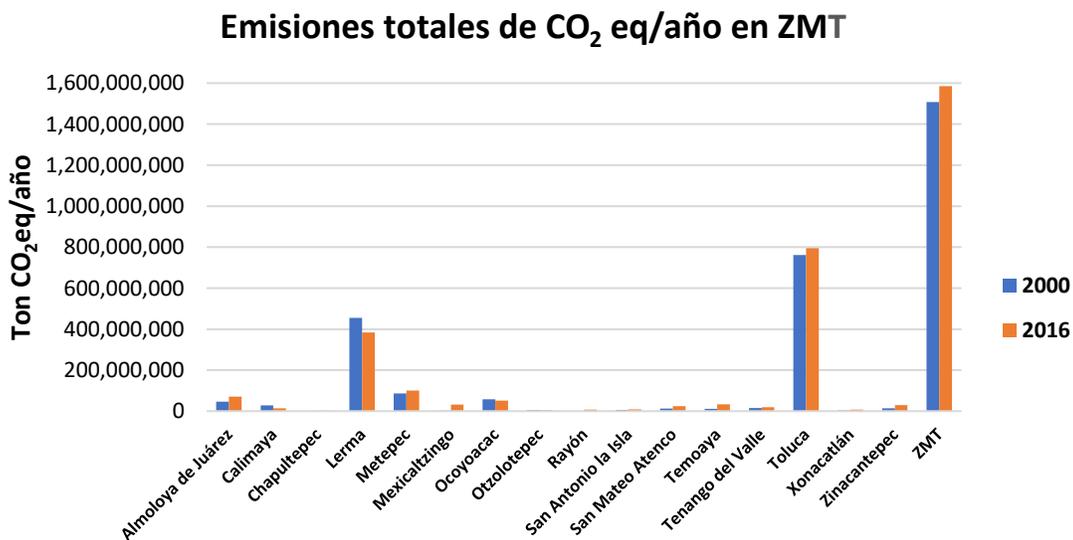
Los municipios con mayores emisiones fueron Toluca (762,040,429 Ton CO₂eq a 795,608,746 TonCO₂eq); Metepec (86,624,592 Ton CO₂eq a 100,906,102 Ton CO₂eq), Almoloya de Juárez (45,763,034 Ton CO₂eq a 70,647,416 Ton CO₂eq), Metepec y Almoloya de Juárez; Lerma en cambio, disminuyó sus emisiones Lerma (454,878,364 Ton CO₂eq a 383,369,358 Ton CO₂eq); mientras que los municipios periféricos tuvieron ligeros incrementos (Figura 22). Este aumento se evidencia precisamente en los municipios centrales de la ZMT en donde se concentra las actividades económicas.

En cuanto al comportamiento de emisiones brutas per cápita en la ZMT, se evidencia una disminución de 939.4 Ton CO₂eq/hab.año a 586.02 Ton CO₂eq/hab.año en el periodo de estudio (cifra que mal interpretada puede conllevar a una decisión de planeación en favor



de la expansión urbana, pero para efectos del ODS13 no sirve ya que ya las emisiones totales se han incrementado y la fuente de suministro para la electricidad es el carbón). Situación que se ve reflejada en los municipios (Figura 23), donde Lerma disminuyó en sus emisiones (4,554.7 Ton CO₂ eq/año a 2,160.2 Ton CO₂ eq/año); al igual que Ocoyoacac (1154.5 Ton CO₂ eq/año a 662.1 Ton CO₂ eq/año); Toluca (1,143.2 Ton CO₂ eq/año a 786.8 Ton CO₂ eq/año) y Metepec (445.5 Ton CO₂ eq/año a 384.3 Ton CO₂ eq/año); mientras que Mexicaltzingo las incrementó de 247.6Ton CO₂ eq en el año 2000 a 2,033 Ton CO₂ eq en 2019; al igual que Rayón con cifras de 90.7 Ton CO₂ eq/año 512.4 Ton CO₂ eq/año.

Figura 22. Emisiones totales de CO₂ eq. en la ZMT



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

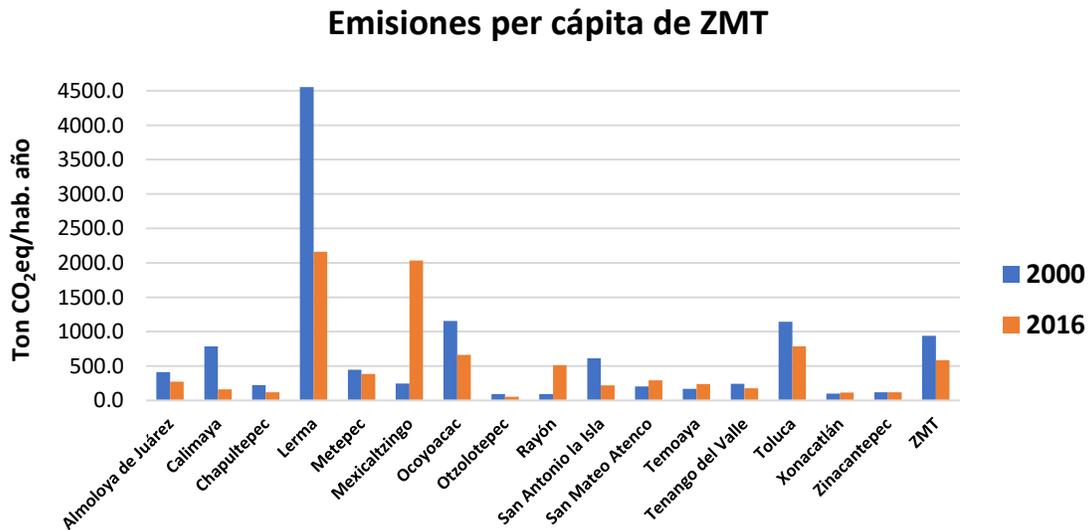
Nota: Los datos completos están en el Anexo 5.

Considerando que la fuente primaria de energía para suplir el consumo eléctrico, entre los años 1990 y 2015, fue dominante en combustibles fósiles (petróleo que pasó del 55.4% al 40.5%, el gas natural del 29.9% al 44.3%; carbón del 2.8% al 6.2%; mientras que las fuentes renovables pasaron del 11.3% al 7.6%; CEPAL,2018), la ZMT incumpliría



nuevamente el acuerdo de Hábitat III en cuanto a la mitigación de gases de efecto invernadero⁴⁷, y el ODS 7 en relación la transición hacia energías renovables.

Figura 23. Emisiones de CO₂-eq per cápita en la ZMT



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: Los datos están en el Anexo 5.

Ahora bien, en la Figura 24 se compara los consumos per cápita de la ZMT con otros países y regiones del mundo, en el periodo de 2000 y 2014. Se observa que a inicio de siglo los consumos de la ZMT, de América Latina y México eran similares (1,554.50 kWh/hab. año, 1,599.60 kWh/hab. año y 1,800.46 kWh/hab. año respectivamente); lo cual cambió para el 2014, ya que la ZMT es la que presenta un menor consumo per cápita en la comparación

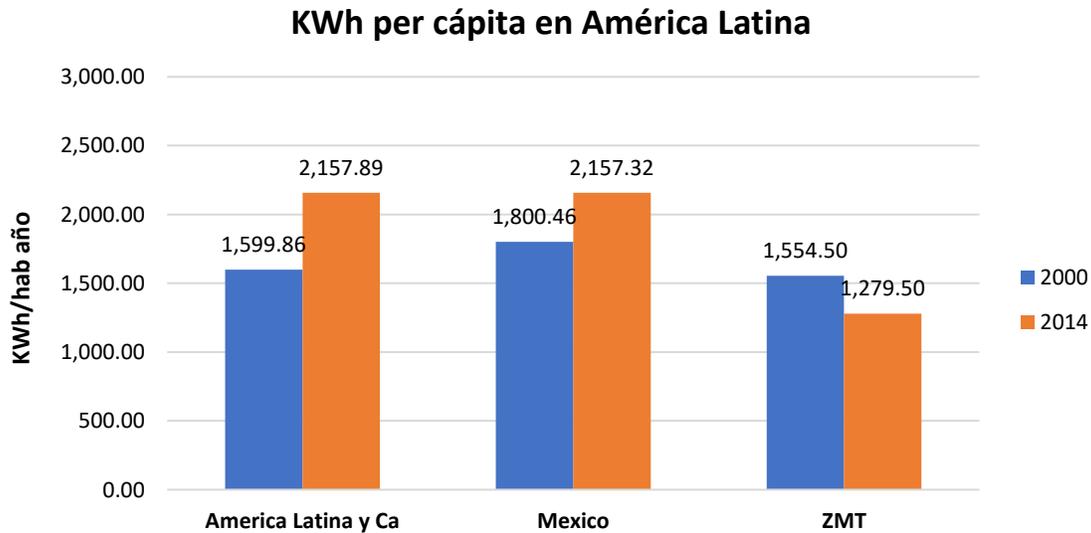
Como conclusión preliminar se sostiene que la ZMT consume electricidad proveniente de fuentes fósiles, que en el periodo de estudio se incrementó en un 5.12%, no tiene políticas que fomenten el consumo de energía proveniente de fuentes renovables. El consumo de electricidad se concentra principalmente en los municipios centrales (Toluca, Metepec y

⁴⁷ Hay que considerar que las energías renovables no garantizan que una disminución real de los gases de efecto invernadero al hacer un estudio de seguimiento de materiales. La construcción de aerogeneradores y otros mecanismos renovables utilizan fuentes fósiles para su fabricación (Castillo, 2011).



Lerma) sin embargo hay un incremento en los municipios periféricos que se han convertido en municipios-dormitorio.

Figura 24. Consumo de electricidad per cápita de la ZMT y otras regiones de América Latina



Fuente: Elaboración propia del autor con base en el Banco Mundial (2022).

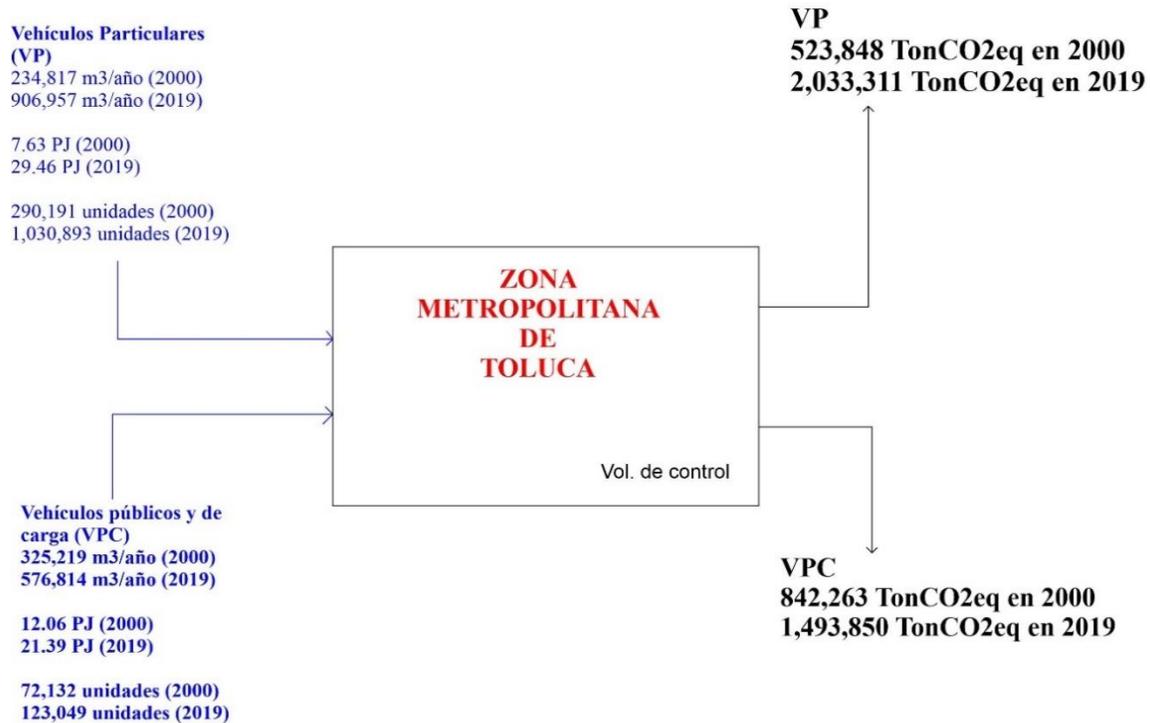
Nota: Los datos se presentan en el Anexo 7.

5.3. Metabolismo energético con base en consumo de combustible

Ante el incremento del parque vehicular, inherentemente el consumo de combustible aumentó. Se observa en la Figura 25 su Balance y en la Tabla 18 que el parque vehicular particular se acrecentó casi 4 veces en el periodo de estudio, pasando de 290,191 unidades en 2000 a 1,030,893 unidades en 2019; por lo que el consumo de combustible ascendió de 234,817 m³/año a 906,957 m³/año, respectivamente, que en términos de energía bruta correspondió a 9.63PJ y 29.46 PJ.



Figura 25. Balance del consumo de combustible en la ZMT



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

En el caso de los vehículos públicos y de carga, el incremento no fue tan significativo como en los particulares, pues pasó de 72,132 unidades a 123,049 unidades; consumiendo 325,219 m³ de diesel en el año 2000 y 576,814 m³ de diesel en 2019, correspondiente en energía bruta de 12.06 PJ y 21.39 PJ.

Tabla 18. Consumo Total de Combustible en la ZMT

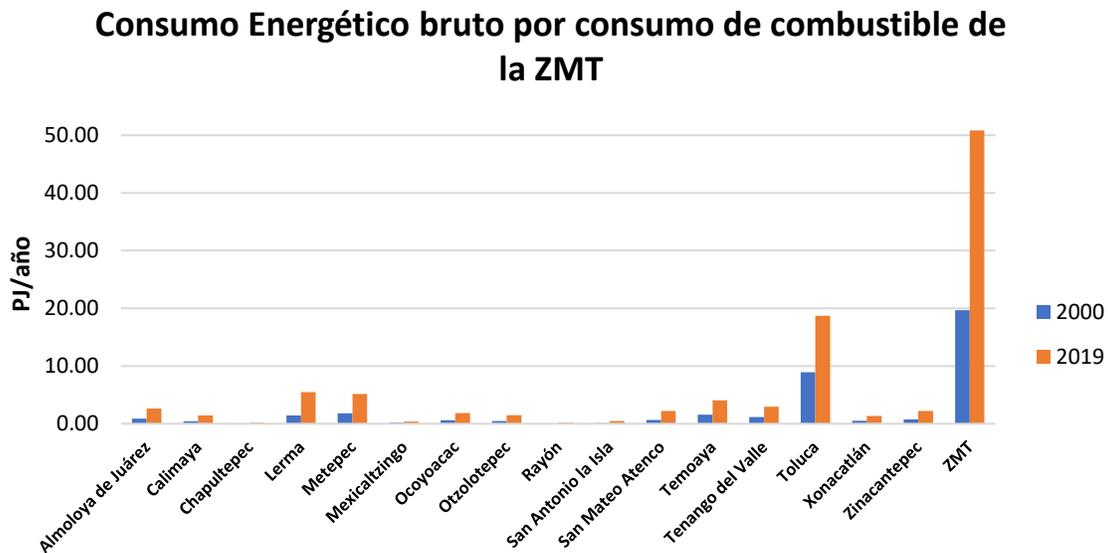
Tipo de vehículo	Año	Población (hab.)	Núm. Total de vehículos	Consumo combustible (m ³ /año)	Consumo másico (Ton/año)	Consumo energético (PJ/año)	Consumo Per cápita (GJ/hab. año)	Incremento Consumo 2000-2019 (Ton/hab. año)
ZMT VP	2000	1,605,571	290,191	234,817	171,416	7.63	4.75	
VPC	2000		72,132	325,219	267,981	12.06	7.51	
VP+VPC	2000		362,323	560,036	439,396.63	19.69	0.27	
VP	2019	2,705,593	1,030,893	906,957	662,078	29.46	10.89	
VPC	2019		123,049	576,814	475,294	21.39	7.91	
VP+VPC	2019		1,153,942	1,483,770	1,137,372	50.85	0.42	53.61

Fuente: Elaboración propia del autor (2022). Nota: Los datos completos están en los Anexos 8 al 13



Al ver la Figura 26, todos los municipios incrementaron su consumo y o de combustible (diesel y gasolina) por el acrecentamiento de su parque vehicular (Anexos 8 al 13), sin embargo, destacan Toluca (8.94 PJ en 2000 a 18.70 PJ en 2019), Metepec (1.79 PJ en el año 2000 y 5.14 PJ en 2019) y Lerma (1.46 PJ/año a 5.47 PJ/año), que al ser los municipios centrales concentran la mayor cantidad de vehículos circulando y que llegan de los municipios periféricos.

Figura 26. Consumo Energético bruto por consumo de combustible en la ZMT



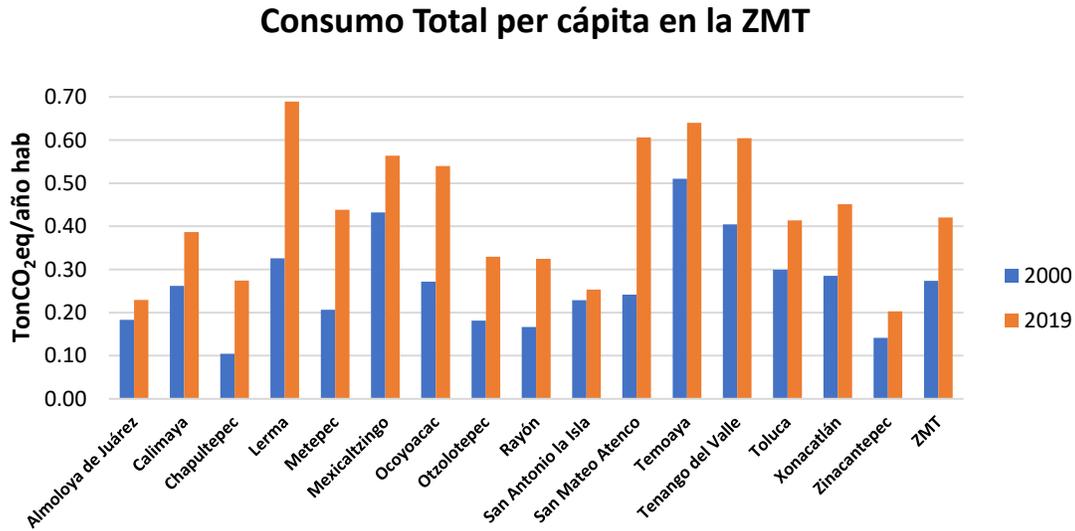
Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: Los datos están en los Anexos 8 al 13

En cuanto al consumo agregado de combustible (diesel y gasolina) per cápita en la ZMT, se aprecia un incremento ya que en el año 2000 fue de 0.27 GJ/hab. año, mientras que en el año 2019 fue de 0.42 GJ/hab. año; señalando que los municipios periféricos concentran el mayor consumo per cápita a diferencia de los centrales (Figura 27; Anexos 8 al 13). Este comportamiento demuestra la alta dependencia al vehículo particular por causa de la expansión urbana, el imaginario de confort, y su preferencia sobre un servicio público, algo que refuerza la hipótesis de ítems anteriores.



Figura 27. Consumo per cápita de los municipios de la ZMT



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

A parte del incremento del número de automotores, del consumo de combustibles y la energía bruta liberada, se presentan colaterales referenciados a la movilidad⁴⁸ y calidad de las vidas; es decir, aumenta el tráfico en una malla vial deteriorada y dispuesta en un diseño policéntrico que ha fragmentado el territorio⁴⁹, consumido espacios naturales y segmentado a la población⁵⁰ (Jiménez *et al.*, 2015).

Ahondado en el tema de movilidad, es importante resaltar que el ritmo de la expansión urbana en la ZMT ha sido ocho veces mayor al crecimiento poblacional en los últimos 40 años (Centro Mario Molina, 2014), favoreciendo el uso intensivo de vehículos privados y la concomitante construcción de infraestructura (puentes, calles amplias, vías rápidas, distribuidores, pasos a desnivel, etc.) que finalmente sucumben en el corto plazo (Hinojosa, 2017); manteniendo el congestionamiento, la accidentalidad y los tiempos de

⁴⁸ La movilidad urbana hace referencia a la capacidad de los habitantes de desplazarse dentro de la ciudad con el objetivo de la satisfacción de sus necesidades, entre ellas, asistir al trabajo, a la escuela, al esparcimiento, etc.

⁴⁹ Los cambios de uso de suelo han sido promovidos por las políticas de liberación de venta de suelo (modificación al artículo 27 constitucional en 1994) y la especulación inmobiliaria (Harvey, 1997).

⁵⁰ La liberación de la venta del suelo ha acrecentado la diferenciación social, segmentando y segregando a los habitantes dependiendo de su clase social y acceso económico (Suárez y Mejía, 2019).



trayecto⁵¹ como una constante metropolitana. Problema que se ahonda con el aumento de desplazamientos desde y hacia los municipios periféricos (Tabla 19), sin contar el incremento de recorridos en cada una de las municipalidades (Suárez y Mejía, 2019)⁵².

Tabla 19. Movilidad de los habitantes de la ZMT

Municipio	2010			2015		
	% Hab. trabajan en el municipio	% Hab. trabajan en la ZMT	%Hab. que trabaja fuera de la ZMT	% Hab. trabajan en el municipio	% Hab. trabajan en la ZMT	%Hab. que trabaja fuera de la ZMT
Almoloya de Juárez	58.3	37.3	4.3	46.6	47.5	5.9
Calimaya	57.2	37.6	5.2	48.7	44.4	6.9
Chapultepec	44.5	44.8	10.8	37.9	50.3	11.6
Lerma	64.6	27.9	7.5	75.8	19.5	4.7
Metepec	59.2	35.4	5.4	64.4	31.5	4.1
Mexicaltzingo	59.5	32.3	8.2	58.4	33.2	8.4
Ocoyoacac	69.6	21.2	9.1	67.3	21.0	11.7
Otzolotepec	48.8	45.3	5.9	66.3	30.9	2.8
Rayón	51.8	38.8	9.4	44.6	46.9	8.5
San Antonio la Isla	60.5	31.0	8.6	37.7	55.4	6.9
San Mateo Atenco	52.8	41.3	5.9	59.5	35.5	5.0
Temoaya	52.8	33.8	3.6	56.5	36.7	6.8
Tenango del Valle	70.5	18.1	11.4	68.3	18.7	13.1
Toluca	86.3	8.2	5.4	90.0	6.3	4.3
Xonacatlán	56.1	38.3	7.7	60.2	33.8	5.5
Zinacantepec	52.1	44.0	3.9	48.0	48.1	2.9

Fuente: Suárez y Mejía (2019)

Ante este problema de movilidad, el transporte público logra mover al 76% de la población⁵³ con una sobre oferta del 25 % (Centro Mario Molina, 2014), con tiempos altos de traslado y rutas altamente concentradas en Toluca, Metepec y Lerma (82% de traslape de las rutas, Hinojosa, 2017), que rápidamente se saturan en horas pico (Jiménez *et al.*, 2015). Galimatías al que se suma la concesión corrupta de más unidades de transporte público, alianzas irregulares con los concesionarios, la incompetencia de algunos conductores, la escasa planeación de las rutas, la falta de mantenimiento del parque

⁵¹ El tiempo de traslado promedio es de 40 min por trayecto, equivalente aproximadamente a 1.5 horas diarias por habitante en radio de 15 km tomando como centro la Ciudad de Toluca (Centro Mario Molina, 2014).

⁵² En la tabla 16, Toluca, Metepec, Lerma, Otzolotepec y San Mateo Atenco, el porcentaje de habitantes que trabajan dentro de ellos se incrementó, lo que refrenda la concentración de actividades en estos municipios (aunque Otzolotepec, no es de los municipios centrales). Mientras que Almoloya de Juárez, Calimaya, Chapultepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Xonacatlán y Zinacantepec muestran gran desplazamiento de sus habitantes, por lo que son los municipios “dormitorio”.

⁵³ Es importante aclarar que para el caso de la Ciudad de Toluca muestra graves problemas de movilidad, pues el 50% de los viajes de transporte privado pasa por sus principales vialidades y el 35% por el servicio público (de la Cruz, 2018).



automotor (de la Cruz, 2018) y la alta inseguridad por asaltos, lo que incentiva la sustitución al transporte privado.

Ante este escenario y evolución y de la ZMT, el comportamiento de las emisiones asociadas a la quema de combustibles muestra un obvio incremento del 58.78% pasando de 1,366,110.41 TonCO₂eq en el año 2000 a 3,157,161.46 TonCO₂eq en el año 2019 (Tabla 20).

Tabla 20. Emisiones totales de CO₂-eq. por consumo combustible

Tipo de vehículo	Año	Emisiones anuales (tonCO ₂ -eq/año)	Emisiones per cápita. (tonCO ₂ -eq./hab. año)	Incremento en el periodo (Ton/hab.)	IEM (TonCO ₂ -eq/m ³)
ZMT	VP	2000	523,848	0.33	
	VPC	2000	842,263	0.52	
	VP+VPC	2000	1,366,110.41	0.85	3.11
	VP	2019	2,023,311	0.75	
	VPC	2019	1,493,850	0.55	
	VP+VPC	2019	3,517,161.46	1.30	52.78

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: IEM es Índice de Eficiencia Metabólica

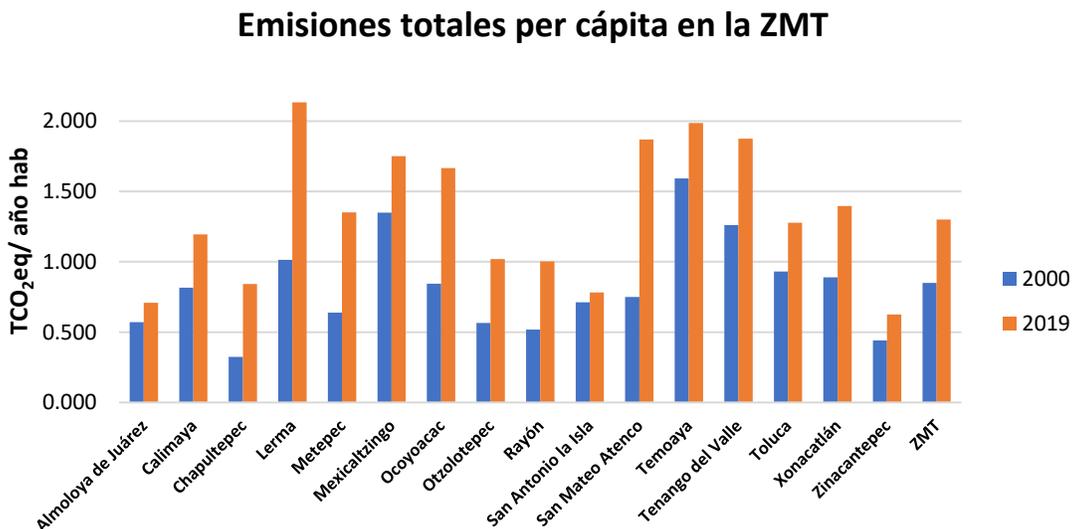
Evidentemente, Toluca, Metepec y Lerma concentran las mayores emisiones, por el parque vehicular y la movilidad que concentran, aunque al haberse incrementado el número de automóviles en los todos los municipios del ZMT, hay incremento de emisiones en todos ellos (Figura 28; Anexos 8 al 13). En cuanto a las emisiones totales per cápita en la ZMT pasaron de 0.85 tonCO₂eq/año a 1.30 tonCO₂eq/año (Tabla 20).

El incremento de las emisiones de CO₂eq indudablemente relacionan un incremento en las emisiones de contaminantes criterio, que se ratifican con las contingencias ambientales que desde 1994 se verifican en la ZMT (GEM, 1997), destacándose en la actualidad las excedencias de las partículas PM₁₀ y PM_{2.5}, que en su mayoría son emitidas por el parque



automotor, cuyas concentraciones son consideradas en el índice IMECA⁵⁴ “malas” (101-150) en verano y “extremadamente malas” (superior a 200) en invierno (Espinoza, 2020).

Figura 28. Emisiones totales de CO₂eq per cápita por consumo de combustible



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: Los datos completos están en los Anexos 8 al 13.

Inclusive, la ciudad de Toluca ocupó el noveno lugar entre las ciudades latinoamericanas con mayores emisiones de PM_{2.5} en 2018 de acuerdo con el World Air Quality Report (2018), y el primer lugar por el mismo motivo a nivel nacional, y donde el 65% de los días de 2019 se tuvo una mala calidad del aire por este contaminante (Toluca Capital, 2019).

Al considerar el comportamiento de los consumos de combustibles fósiles, el parque automotor, infraestructura urbana, el tráfico y la pérdida de la calidad del aire desde la lógica del índice metabólico decreció pasando de 3.11 a 3.09, cifra que se explica desde una aproximación económica de la paradoja de Jevons⁵⁵ y desde el fenómeno de la combustión

⁵⁴ IMECA son las siglas del Índice Metropolitano de Calidad del Aire. Es un indicador simple para señalar a la población el estado que guarda la calidad del aire, inicialmente en la Ciudad de México. Se sustenta en el Pollutan Stardard Index o PSI de Estados Unidos (Comisión Ambiental de la Megalópolis, 2018). Sus cálculos se fundamentan en los gases emitidos en el proceso de combustión.

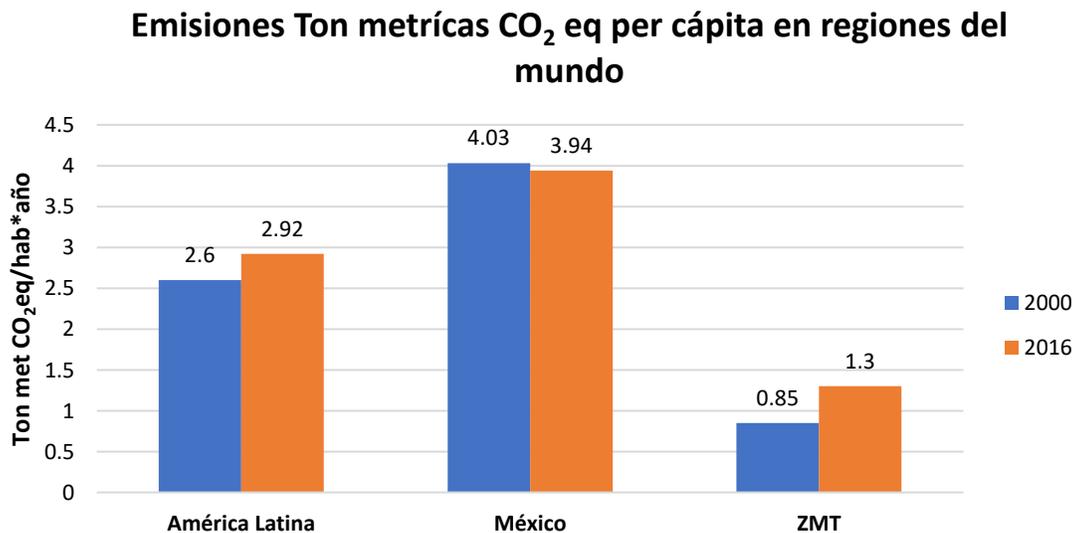
⁵⁵ La paradoja de Jevons muestra cual engañoso es el camino de la supuesta eficiencia energética; incluso aunque se utilicen vehículos híbridos o eléctricos, pues a un mayor avance tecnológico, se incita al consumo y consecuentemente se ejerce una presión a la naturaleza sobre la requisición de materiales y se emiten mayores cantidades de contaminantes.



en sí. Para el primer punto, la población promedio cree que un vehículo eficiente es menos contaminante, razón por la cual, aumenta el uso recorriendo mayores distancias y el parque automotor por rápida reposición. En el segundo punto, la disminución aparente de las toneladas de CO₂eq evidencia un problema mayor en la combustión, porque la especie química está siendo sustituida por CO que es tóxico, lo que indica pérdida de eficiencia en los motores, entre otras causas, por falta de mantenimiento; más cuando éstos presentan eficiencias de diseño de 30% en gasolina y 48% en diesel (Llanes *et al.*, 2018; Ramírez, 2018).

Finalmente, al comparar las emisiones de CO₂eq per cápita de la ZMT con otros sistemas termodinámicos a partir de información del Banco Mundial (2022) es de notar que la ZMT emite casi un tercio de las emisiones totales de México y la mitad de las totales de América Latina (Figura 29).

Figura 29. Emisiones de toneladas métricas de CO₂eq. per cápita en algunas regiones y la ZMT.



Fuente: Elaboración propia del autor con base en el Banco Mundial (2022)

Nota: Los datos se pueden ver en el Anexo 14.

1Ton métrica equivale a 1000 kg



A nivel global, ante lo mostrado en esta figura, no hay acciones fehacientes para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, mucho menos de las potencias mostradas. (COP26). En el caso de las economías emergentes (América Latina), su patrón de urbanización define el modo de vida de sus habitantes (Cruz, 2021); que para el caso de la ZMT se está poniendo en riesgo sus límites homeostáticos, no solo por lo ya mencionado anteriormente sino por la cantidad de entropía generada y no disipada, condición que aumenta las brechas sociales (desigualdad pobreza y disminución de calidad de vida).

Algunos autores, señala Díaz (2020) ven a través de los ODS como la oportunidad que tienen las ciudades de ser los espacios para alcanzar la sustentabilidad sin comprometer el crecimiento económico. Sin embargo, ante la evidencia, la ZMT está termodinámicamente lejos de cumplir el protocolo de Kioto, el acuerdo de Paris, y los ODS 7 y 13.

5.4. Metabolismo por producción de alimentos y Generación de Residuos Sólidos Urbanos

En el periodo de estudio, la ZMT presenta dos cuestiones a destacar en cuanto a la producción agrícola. La primera, es que la productividad se incrementó pasando de 784,266 ton en el año 2000 a 1,368,144 ton en 2019, es decir un 57.32% (Tabla 21). Siendo Tenango del Valle el municipio con mayor productividad (400,483 ton en el año 2000 a 678,104 ton en 2017) seguido de Almoloya de Juárez (91,940 ton/año a 229,250 ton/año), Toluca (69,247 ton/año a 97,034 ton/año), Temoaya (36,777 ton/año a 63,628 ton/año) y Zinacantepec (40,476 ton/año a 62,368 ton/año; Figura 30).

Esta situación fue refrendada en el Plan de Desarrollo Estatal del periodo 2011 a 2017, donde se señala que cuatro quintas partes del territorio de estos municipios, además de



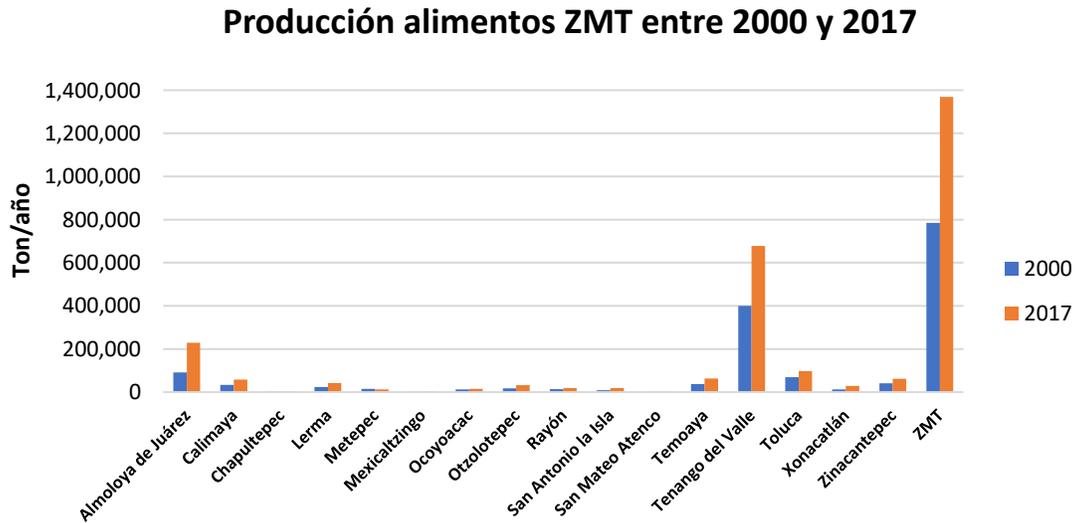
Rayón, Mexicaltzingo, San Antonio la Isla, Chapultepec, tenían una función no urbana, por ende, la actividad primaria, era la predominante (GEM, 2011).

Tabla 21. Producción agrícola de la ZMT

ZMT/Año	Población	Producción agrícola (ton/año)	Incremento (porcentaje)	Producción. per cápita (kg/hab., año)
2000	1,605,571	784,226		488.44
2017	2,705,593	1,368,144	57.32	505.67

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Figura 30. Producción de alimentos de la ZMT entre 2000 y 2017



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: Los datos completos están en el Anexo 15.

En contraste, el segundo punto, en el Plan de Desarrollo del Estado de México del periodo 2018 a 2023, determinó que entre 2010 y 2016 la superficie sembrada en toda la entidad disminuyó de 908.8 miles de hectáreas a 882.2 miles de hectáreas, mientras que la cosechada se redujo de 784.3 a 780.2 miles de hectáreas, de las cuales el 75.6% se destina a cereales, el 67.1% a maíz, 5.9% a cebada y 14.9% a forrajes; reflejándose en la disminución en la contribución del Estado de México al PIB federal en los últimos 20 años, pasando del



2% en el periodo de 2003 a 2008 al 1% desde 2009 hasta 2014 (INEGI, 2014 en Orozco *et al.*, 2017).

Además, esto se puede observar en las Tabla 22, que muestran datos de agricultura de temporal⁵⁶ respectivamente del maíz, se constata que la que superficie de siembra ha estado disminuyendo con el tiempo, más aún, la superficie cosechada, pero el rendimiento de la agricultura aumentó, lo que es consistente con el incremento del 57.32% antes señalado. Estos datos muestran que el rendimiento en la siembra ha aumentado, alcanzando alrededor de 4 ton/ha. en 2017, mostrando producciones entre 200 mil y 100 mil toneladas.

Tabla 22. Agricultura de temporal en el Distrito de Toluca, entre 2006 y 2020

Distrito Toluca	Población (hab)	Superficie (ha)		Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)	Tasa per cápita	Relación sup sembrada / hab (ha/hab)
		Año	sembrada	cosechada	obtenida	obtenido	kg/hab.año
1,605,571	2006	136,568	70,384	229,412	3.259	142.88	0.085
	2009	135,668	105,294	292,118	2.774	181.94	0.084
	2010	132,098	70,017	212,367	3.033	132.27	0.082
	2011	131,773	54,076	133,371	2.466	83.07	0.082
	2012	132,020	66,349	226,296	3.411	140.94	0.082
	2013	121,763	43,295	170,322	3.934	106.08	0.076
	2015	116,612	47,834	174,880	3.656	108.92	0.073
	2016	116,846	65,232	310,277	4.757	193.25	0.073
2,705,593	2017	112,496	82,729	396,390	4.791	146.51	0.042
	2018	105,834	73,072	304,450	4.166	112.53	0.039
	2019	96,192	26,157	112,065	4.284	41.42	0.036
	2020	97,355	34,258	149,989	4.378	55.44	0.036

Fuente: Elaboración propia del autor con base en los datos de la SIAP (nd)

Nota: Producción únicamente de maíz.

En este sentido, hay que destacar la realidad dicotómica con respecto a la agricultura, por un lado, uso de semillas híbridas (no transgénicas) que ayudan a aumentar el rendimiento⁵⁷; y por el otro, la volatilidad en los precios, la disminución de la mano de obra agrícola

⁵⁶ En 2008 la agricultura ocupaba el 46% de la superficie total del Estado de México, siendo el 80% de temporal y el 20% de riego (Orozco *et al.*, 2017).

⁵⁷ Generalmente las cruza de semillas son hechas por los agricultores tradicionales, lo que ha dado gran variedad de maíz. En cambio, la siembra de riego utiliza semillas únicas (Montecillo, 2016)



(Barkin, 1991), las sequías⁵⁸ (Orozco *et al.*, 2017) y la progresiva sustitución del maíz por cultivos más rentables (SIAP, 2012) como hortalizas y flores de invernadero.

Ante la incertidumbre en los precios, los productores han tratado de adaptarse, principalmente reduciendo el área de la superficie sembrada cuando los precios no son favorables, operando bajo una lógica de milpa (Aranda, 2000), optando por la siembra de maíz y avena forrajeras; o utilizando y/o haciendo uso intensivo de fertilizantes para aumentar la productividad cuando los precios son favorables (Orozco *et al.*, 2017).

En cuanto al cambio de uso de suelo entre 1984 y 2018, la actividad minera de arena y grava ha sustraído terrenos cultivables en los municipios de Zinacantepec, Metepec, Calimaya (SE, 2020), pasando de 864.96 ha en 1984 a 1,264.41 ha en 2018, al mismo tiempo que la expansión urbana hace lo propio (Tabla 23), provocando que la superficie agrícola disminuyera en el mismo periodo un 23.41% (equivalente a 35,303.83 ha.), mientras que la mancha urbana aumentó 235.84%, traducido en 33,639.2 ha; al tiempo que los cuerpos de agua superficiales se redujeron un 7.03%, es decir, 3,199.21 ha a 2,974.43 ha. (Adame *et al.*, 2020b), de tal suerte que dichos cambios se aprecian en las Figuras 30 y 31.

Tabla 23. Cambio de uso de suelo de la ZMT entre 1984 y 2018

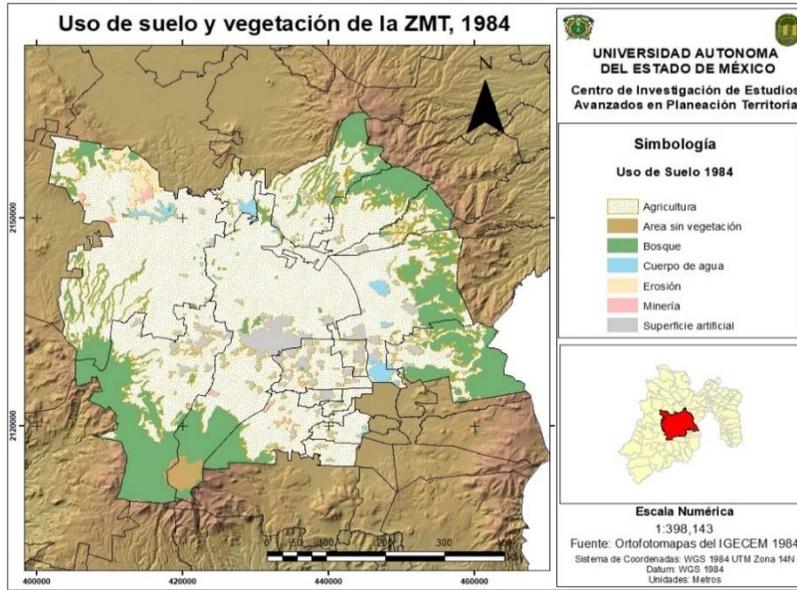
Uso de suelo de la ZMT	Año/ Superficie (ha)			Porcentaje	
	1984	2018	Diferencia (ha)	Incremento	Pérdida
Agricultura	150,800.5	115,496.67	35,303.83		23.41
Área sin vegetación	2,077.8	1,833.03	244.77		11.78
Bosque	50,075.3	527,57.86	2,682.56	5.36	
Cuerpos de agua	3,199.21	2,974.43	224.78		7.03
Erosión	2,399.16	1,296.85	1,102.31		45.95
Minería	864.96	1,264.41	399.45	46.18	
Urbanización	10,902.21	44,541.83	33,639.62	235.84	
Total	220,319.14	220,165.08			

Fuente: Adame *et al.*, (2020b)

⁵⁸ Las sequías se presentaron los años 2002, 2005, 2009, 2011.

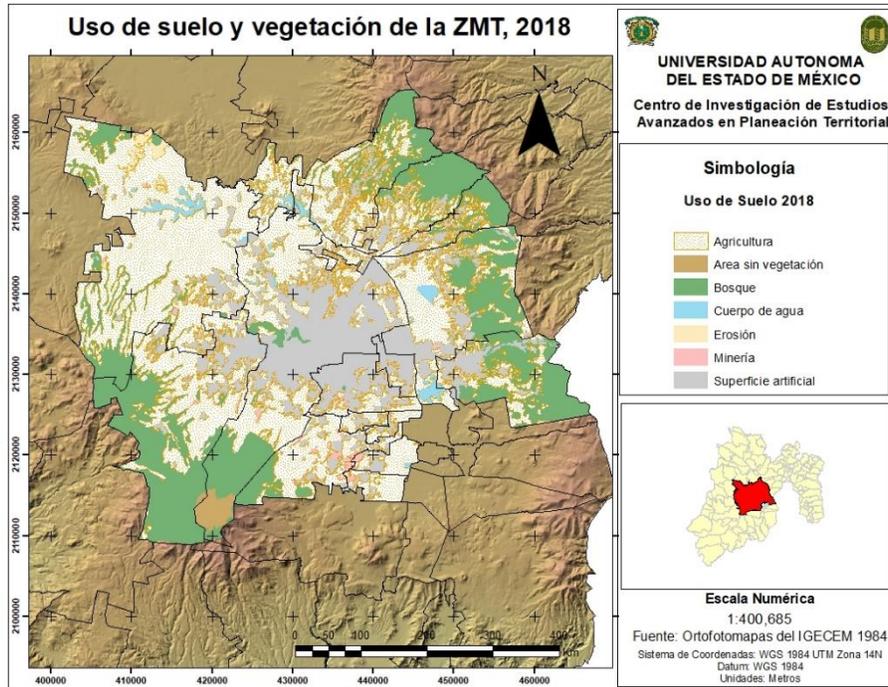


Figura 30. Uso de suelo en la ZMT en 1984



Fuente: Adame *et al.*, (2020b)

Figura 32. Uso de suelo en la ZMT en 2018 (Referencia antes pie de página)



Fuente: Adame *et al.*, (2020b)



Esto significa que, al paso del tiempo, el Estado de México al igual que la zona de estudio tienen una enorme incapacidad para solventar las necesidades alimentarias de su población. La tasa per cápita de consumo de maíz en México corresponde 196.4 kg/hab. año (SAGARPA, 2017), sin embargo, con los datos de la Tabla 22, la tasa per cápita de maíz producido es de 146.51 kg/hab. en 2006 año, y para 2020 fue 55.44kg/hab. Esto da cuenta de la alta vulnerabilidad la ZMT enfrenta ante la solvencia alimentaria de su propia población.

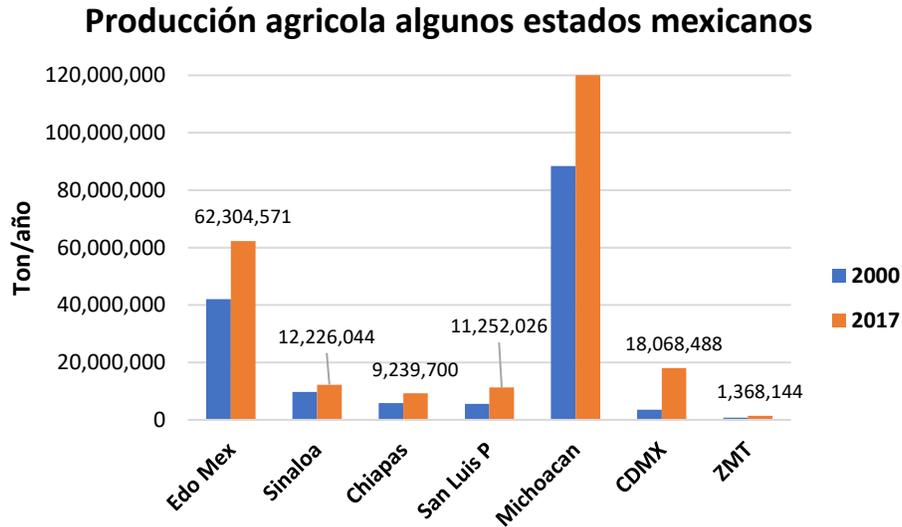
Incluso, el Gobierno del Estado de México admite que existe limitaciones al acceso a la alimentación, principalmente para la infancia, que “*presenta una inadecuada ingesta de alimentos por prácticas inapropiadas de alimentación y dieta*”, lo que compromete su seguridad alimentaria, siendo actualmente leve y moderada (GEM, 2018). La desnutrición infantil y consumo de alimentos de valor nutricional bajo, sobre todo en áreas rurales, exacerbaban la desigualdad social. Finalmente, es importante advertir el riesgo que conlleva la sustitución de cultivos en el Estado de México, para favorecer la exportación de flores⁵⁹ (Figura 33).

Como conclusiones preliminares, la ZMT tiene un riesgo de seguridad alimentaria por: 1) la desaparición progresiva de la milpa, 2) el uso intensivo de agroquímicos y su consecuente agotamiento de suelo, 3) la reducción del área cultivable, 4) la sustitución de cultivos, y 5) los cambios en la alimentación local y la preferencia por los alimentos rápidos y procesados, y 6) la disminución de la oferta hídrica y su acceso. En este sentido, las deficientes implementaciones de los planes gubernamentales evidencian que la ZMT incumple con el ODS 2, pues no se garantiza su disponibilidad alimentaria a su población.

⁵⁹ La producción agrícola de la ZMT equivale al 2.19% del total de la producción del Estado de México, el cual está enfocando su vocación agrícola a la producción de flores y algunos cultivos (tuna y avena) de exportación, donde el gobierno brinda apoyos a los productores con infraestructura, asesorías técnicas, apoyos con fertilizantes químicos y semillas (GEM, 2021).



Figura 33. Producción agrícola de algunos estados mexicanos con la ZMT



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: Los datos están en el Anexo 16.

5.4.1. Generación de Residuos Sólidos Urbanos

La generación de residuos sólidos son una expresión de la ineficiencia natural en cualquier proceso de transformación y consumo de los materiales, acorde con la Segunda y Cuarta⁶⁰ Leyes de la Termodinámica; su generación es inevitable, y para el caso de México, exacerbada, principalmente por: 1) el modelo neoliberal fundamentado en el consumo, 2) el no cumplimiento de normas referentes a la gestión de materiales de materiales de un solo uso, 3) los hábitos de compra en los hogares, 4) las prácticas culturales y festivas, 5) la escasa separación en la fuente, 6) la falta de cobertura en el servicio de recolección de basura y, 7) los problemas existentes en la disposición final.

⁶⁰ La cuarta ley procede desde la Economía Ecológica y fue acuñada por Georgescu-Roegen (Georgescu-Roegen, 1971; García, 2003).



En la ZMT la dimensión del problema se expresa en un incremento de 3 mil toneladas por lustro, pasando de 547,610 ton en el año 2000 a 560,000 ton en 2015 (Tabla 24); con una aparente disminución en Toluca, San Mateo Atenco, Metepec y Zinacantepec, siendo éstos altamente urbanizados (Figura 34), donde el porcentaje de recolección de materiales reciclables⁶¹ solo alcanza el 5%⁶² (Rodríguez y Montesillo, 2017) en un contexto favorable para el aprovechamiento de estos materiales (El Economista, 2021), toda vez que el 49.08% de los residuos generados en la ZMT corresponden a papel, textiles, plásticos, vidrio, aluminio y otros metales (Iglesias, 2007).

Tabla 24. Volumen de RSU vertidos a rellenos sanitarios en la ZMT

ZMT/Año	Vol. RSU vertidos a rellenos sanitarios (ton/año)	Kg/hab. * año	Kg/hab. * día
2002	547,610	341.07	0.93
2015	560,000	206.98	0.57

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Por otro lado, al hablar de sitios de disposición final, en la ZMT existen 13 rellenos sanitarios y 3 tiraderos a cielo abierto o clandestinos (Tabla 25), sin embargo, a pesar de la existencia de normas locales, no todos los rellenos cumplen con la exigencia normativa requerida. Además, existe la práctica de la quema de basuras⁶³, o su arrojo en cuerpos de agua o barrancas en las localidades con elevados índices de pobreza⁶⁴.

⁶¹ A nivel nacional, en promedio se recicla el 4.8% del volumen total de RSU, de los cuales aproximadamente el 10% se recolectan antes de llegar en los sitios de disposición final (Rodríguez y Montesillo, 2017).

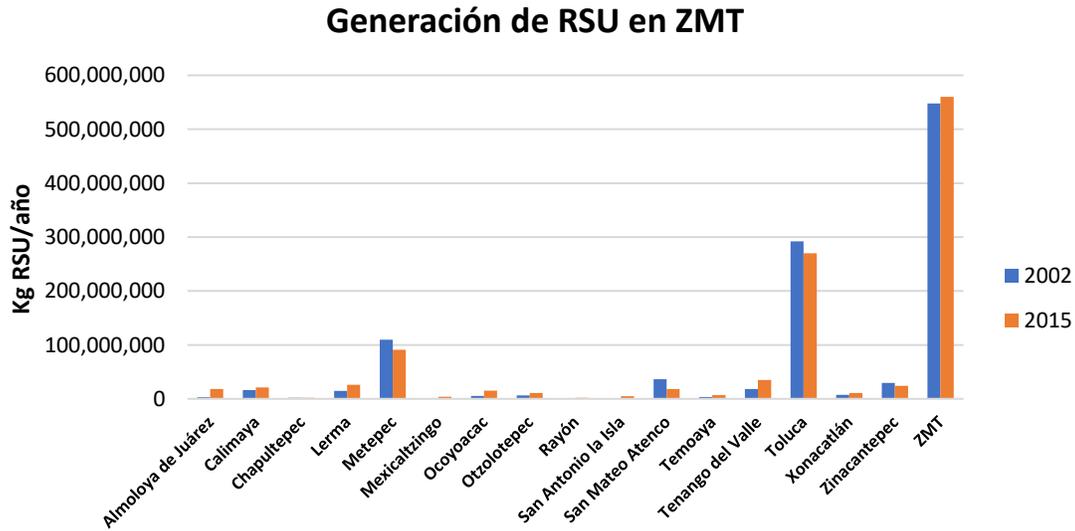
⁶² En el municipio de Toluca, según reportan Rodríguez y Montesillo (2017) lo que más se obtiene es PET (76%), papel y cartón (18%), vidrio (3%), metales (2%) y otros plásticos (1%).

⁶³ En celebraciones importantes como el 24 y 31 de diciembre la quema de llantas y otros productos altamente tóxicos es una costumbre frecuente y se muestran en los altísimos índices de contaminación atmosférica, que llegan a superar los 200 IMECA.

⁶⁴ Destaca en este sentido, el 40.9% de los habitantes de Almoloya de Juárez tienen la costumbre incinerar sus residuos, el 17.2% de la población de Temoaya, el 12.6% de Oztolotepec y el resto de la ZMT entre el 6 y 9.3% (Gómez, 2021).



Figura 34. Volumen de RSU vertidos en rellenos sanitarios por municipio



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)
 Nota: Los datos están en el Anexo 17.

Tabla 25. Rellenos Sanitarios por municipio de la ZMT

Municipio	Disposición final (Ton/día) en 2015	Sitios de Disposición final
Almoloya de Juárez	49,315.1	Tiradero a cielo abierto en ejido de Tres Barrancas
Calimaya	57,534.2	Tiradero a cielo abierto
Chapultepec	5,479.5	Relleno Sanitario de Chapultepec y San Antonio la Isla
Lerma	71,232.9	Relleno Sanitario de Xonacatlán
Metepec	249,315.1	Relleno Sanitario de San Antonio la Isla
Mexicaltzingo	10,958.9	Tiradero a cielo abierto de Mexicaltzingo y Relleno Sanitario de San Antonio la Isla
Ocoyoacac	41,095.9	Relleno Sanitario de Xonacatlán
Otzolotepec	30,137.0	Relleno Sanitario de Xonacatlán
Rayón	5,479.5	Relleno Sanitario de San Antonio la Isla
San Antonio la Isla	13,698.6	Relleno Sanitario de San Antonio la Isla
San Mateo Atenco	49,315.1	Relleno Sanitario de San Antonio la Isla
Temoaya	19,178.1	Relleno Sanitario de Xonacatlán
Tenango del Valle	95,890.4	Tiradero a cielo abierto de Tenango del Valle
Toluca	739,726.0	Relleno Sanitario de San Antonio la Isla, Zinacantepec, Xonacatlán y Tlalnepantla*
Xonacatlán	30,137.0	Relleno Sanitario de Xonacatlán
Zinacantepec	65,753.4	Relleno Sanitario de Zinacantepec

Fuente: Elaboración propia del autor con base en Gómez (2021)
 Nota: los datos de disposición final son los mostrados en el Anexo 17.
 *Fuente de Calderón *et al.* (2011)



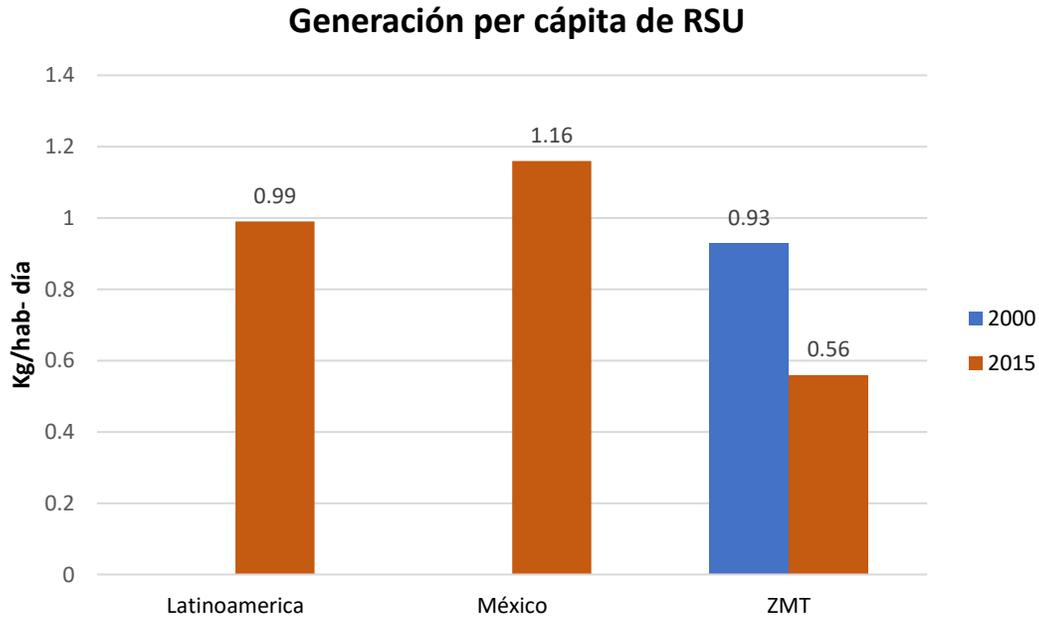
Adicional al problema técnico de la gestión de basura cuyo esquema se fundamenta en metabolismo lineal denominado “*recolección y disposición final*” (Sáez *et al.*, 2014), se suma la poca articulación a nivel operativo, directivo y financiero entre los instrumentos⁶⁵ y las entidades encargadas de llevarlos a cabo, la obsolescencia de dichos instrumentos, la poca disponibilidad de información confiable (Sánchez *et al.*, 2019), la improvisación de políticas que no están sustentadas en estudios serios, la conformación de grupos de poder disponen de concesiones irregulares para controlar la operatividad de los sistemas de recolección y disposición final de los residuos (Calderón *et al.*, 2011; Reporte Índigo, 2021).

Por otro lado, en la Figura 35 se evidencia que la ZMT genera más de la mitad de RSU per cápita que el promedio de México y de Latinoamérica, quedando mostrado la gravedad del problema que presenta actualmente y el potencial incumplimiento del ODS 12.

⁶⁵ La ZMT enfrenta un grave problema de manejo de residuos sólidos. De acuerdo con la Ley General de Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos (LGPGIRS), cada gobierno municipal debe contar con un programa de gestión de residuos, plasmado en sus Planes de Desarrollo Urbano (PDU) y en sus Planes Municipales de Desarrollo (PMD), sin embargo, algunos están obsoletos y la información proporcionada en cada plan es poco confiable (Gómez, 2021), por lo que la gestión de las basuras es poco eficaz.



Figura 35. Producción de RSU per cápita de la ZMT y otras regiones del mundo



Fuente: Elaboración propia del autor con base en Kaza *et al.*, (2018) y Forbes (2020)
Nota. Los datos están en el Anexo 18.

5.5. Metabolismo de las actividades económicas

En cuanto a las actividades económicas que se llevan a cabo en la ZMT (Tabla 26), se consideró el periodo entre 2004 y 2018, observándose una leve caída en el PBT (PIB) en 2009 como consecuencia de la crisis mundial de 2008 (Juárez *et al.*, 2015), y con repunte en los años posteriores (Figura 36), al mismo tiempo que el incremento per cápita de las actividades terciarias, que fue superior (0.13 millones de pesos) al del sector secundario (0.01 millones de pesos).



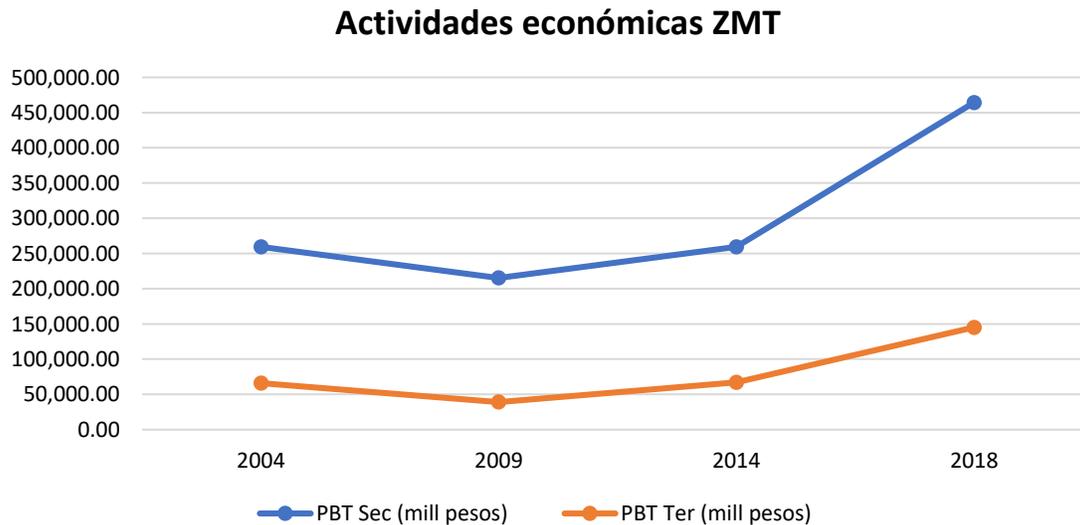
Tabla 26. Variación PTB en las distintas actividades económicas de la ZMT

ZMT/Año	PBT Sec. (millones pesos)	PBT Ter (millones pesos)	PBT Sec. per cápita (millones pesos/hab)	PBT Ter per cápita (millones pesos/hab.)
2004	259,541.27	65,894.89	0.162	0.041
2009	215,269.87	39,036.74		
2014	259,541.27	66,909.62		
2018	464,333.33	145,161.94	0.172	0.054

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: Los datos por municipio están en el Anexo 19.

Figura 36. Evolución del PBT en la ZMT entre 2004 y 2018

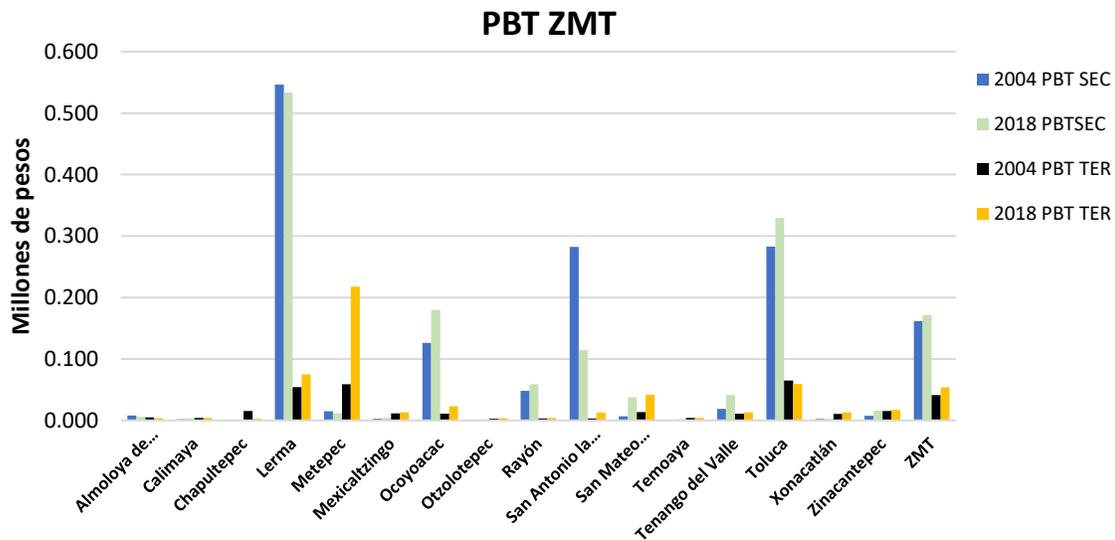


Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

En la Figura 37 se observa que Lerma, Toluca y Ocoyoacac mantuvieron su vocación industrial, mientras que en San Antonio la Isla se desplomó en las actividades secundarias y que Metepec se reafirmó como el centro de las actividades terciarias; y en este sentido, hay un incremento de éstas en los municipios periféricos.



Figura 37. Actividades económicas municipales en la ZMT



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota. Los datos están en Anexo 19.

Para entender este fenómeno, la transición al modelo neoliberal que se presentó en el mundo desde la década de los 80, afectó directamente las actividades económicas de México y de la ZMT, reflejándose en: 1) una caída en el PIB del sector industrial⁶⁶, 2) su especialización⁶⁷ y maquilas, 3) el cambio de modelo de sustitución de importaciones que producía para el consumo local al de exportación, 4) el comienzo de la terciarización de la zona como el “avance lógico” del crecimiento económico (Márquez y López, 2008), y 5) la disminución de la participación del Estado como regulador de las actividades económicas.

En la Figura 38 se observa también el crecimiento de las actividades terciarias en los municipios de Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Oztolotepec Xonacatlán y Zinacantepec, como parte de la transformación de la economía local, que en los últimos 30

⁶⁶ De 1970 a 1980 el PIB estatal era a una tasa anual de 9.1% y el crecimiento manufacturero era del 7.5%, en contraste, desde 1980 a 1988 el PIB decreció hasta un 3.3% y el sector industrial hasta un 2.6%. Es decir, en los años 70 el sector secundario representaba el 48.1% del PIB estatal; en 1985 cayó al 40.2%, en los 90 pasó al 31.8%, en la siguiente década al 32.7% y en 2008 llegó al 32.1%. Esto se reflejó en la actividad industrial de la ZMT, donde su participación pasó en los años 70 de 79.1% al 66.2% en 2008 (Rendón, *et al.*, 2016).

⁶⁷ En 1994 Toluca se especializó en la industria metalmecánica, alimenticia, de minerales no metálicos, papelera, maderera, química, textil y farmacéutica. Lerma con textil, metales básicos, madereras y químicas. Ocoyoacac con industria química y farmacéutica. Xonacatlán y Zinacantepec con fábricas alimenticias, y San Mateo Atenco con las textiles y alimenticias (Aranda, 2000).



años se ha visto reflejada en la creación de plazas comerciales⁶⁸, el incremento en las actividades de infraestructura e inmobiliarias, grandes establecimientos comerciales y las llamadas “tienditas” (el pequeño comercio) sobre todo en los municipios periféricos; impactando en las preferencias de consumo y esparcimiento, desligándose de las tradiciones locales como la visita al tianguis, la preparación de comidas ancestrales, la vida en milpa, el disfrute de temascal y la vida en familia, entre otras.

En cuanto al impacto del sector inmobiliario se refiere, su detonante comenzó en los años ochenta con el flujo masivo de excedentes de grupos extranjeros y locales que invirtieron en finca raíz, con el fin de aprovechar ciclos hipotecarios de alta rentabilidad; inicialmente en centros comerciales, para luego consolidarse en proyectos de casa habitación.

En la Figura 38 se muestra el crecimiento de este sector entre 2004 y 2018, donde se ve una tendencia al alza en PBT, pasando de 828.19 millones de pesos a 2,167.71 millones de pesos, sobre todo en los últimos cuatro años y no se ha detenido, sobre todo en Lerma, Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec; evidenciando un drástico cambio de uso de suelo por urbanización, llegando a 33,639.62 ha. las cuales fueron sustraídas, naturalmente, de suelo agrícola (Figuras 30 y 31). Las milpas se convirtieron para el año 2015 en 532,755 viviendas (Tabla 27)⁶⁹.

Con la rápida urbanización de la ZMT ratifica la afirmación de Harvey (2012) que las ciudades son instrumentos de mercado, donde la vivienda ya no es un derecho del trabajador sino una mercancía cuyo valor fluctúa drásticamente en el tiempo; y donde el Estado se convierte en un facilitador otorgando créditos con tasas de interés casi a los mismos niveles de una institución bancaria. Bajo este modelo neoliberal el sector

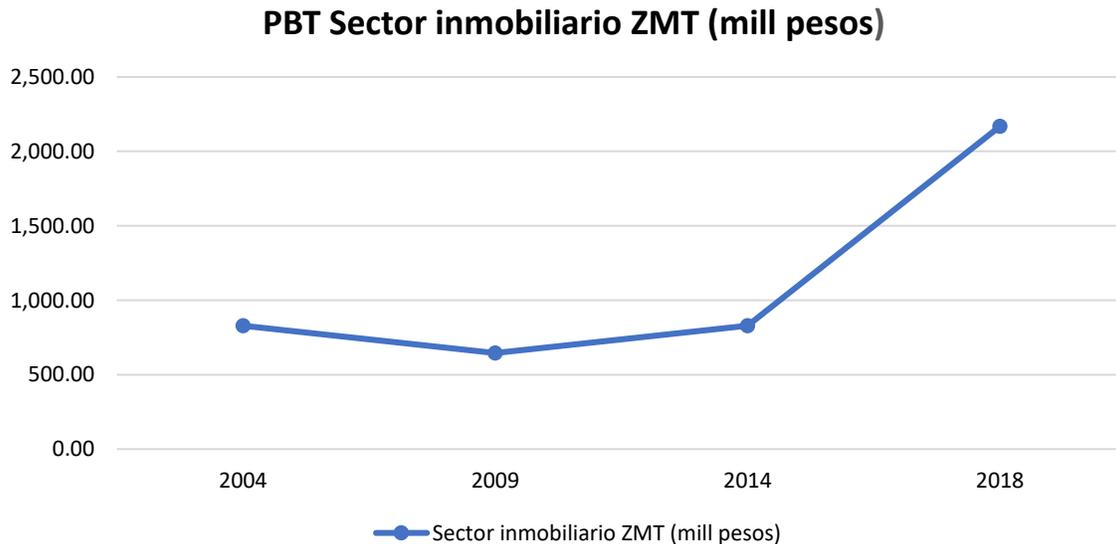
⁶⁸ El municipio de Toluca está en un proceso lento de desindustrialización, mostrado en la construcción de construcción de plazas comerciales como lo es “Galerías Toluca” que está ubicado entre las empresas Pfizer y Nestlé, es decir, espacio originalmente dedicado al sector secundario (Hernández, 2017), lo que se ve reflejado en servicios intangibles (esparcimiento, información en medios masivos) y tangibles (hoteles, restaurantes, escuelas privadas, centros bancarios, hospitales privados; Gaspar y Orozco, 2015).

⁶⁹ En el año 2000 había 325,511 viviendas.



inmobiliario es quien decide las características, localización y costos de la vivienda subyugando los planes de urbanismo locales (Salinas y Soto, 2019)⁷⁰.

Figura 38. PBT del sector inmobiliario de la ZMT entre 2004 y 2018



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: los datos completos están en el Anexo 20

Como consecuencia, Márquez y Pradilla (2016) expresan que el sector de la construcción ha “*llevado a la subordinación de las políticas urbanas a los intereses del capital inmobiliario-financiero, por razones de prestigio (modernización), de competitividad urbana o porque la desindustrialización ha dejado como único motor de la creación de empleo a la industria de la construcción*”, provocando la expansión de un suelo urbano disperso, fragmentado y heterogéneo, que se configura en función del poder adquisitivo, originando problemas de gentrificación, desplazamiento hacia las periferias (de bajo precio de suelo) y ambientales, anteriormente descritos (Adame *et al.*, 2020; García *et al.*, 2015).

⁷⁰ Ahora bien, Salinas y Soto (2019) reportan que en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) existen intereses político-económicos entre las constructoras y los gobiernos locales, y esto determina el tiempo en que se establecen los tiempos para los permisos de construcción, por lo que se establecen “*acuerdos*” para agilizar los permisos. En la ZMT sucede el mismo fenómeno, además que las inmobiliarias pueden aprovecharse de “*vacíos legales*” lo que afecta directamente a la política de planeación local, en primer lugar, al no cumplir con los tiempos reglamentarios, y segundo, se alteran los planes establecidos en los gobiernos³³.



Tabla 27. Número de viviendas en la ZMT entre 2000 y 2015

Municipio	Número de viviendas		
	2000	2005	2015
Almoloya de Juárez	21,999	26,225	41,966
Calimaya	7,153	7,464	13,394
Chapultepec	1,183	1,454	3,068
Lerma	20,659	22,538	34,366
Metepec	43,852	50,035	59,571
Mexicaltzingo	1,727	2,001	2,878
Ocoyoacac	ND	11,182	14,857
Otzolotepec	10,713	13,349	17,713
Rayón	1,683	2,949	3,077
San Antonio la Isla	1,806	2,235	7,082
San Mateo Atenco	11,983	13,893	17,775
Temoaya	12,384	14,525	22,582
Tenango del Valle	12,975	14,405	20,144
Toluca	145,649	174,962	218,639
Xonacatlán	8,106	9,314	11,405
Zinacantepec	23,639	28,448	44,258
ZMT	325,511	394,979	532,775

Fuente: Elaboración propia del autor con base en INEGI (2000, 2006 y 2017)

La desigualdad habitacional en la ZMT se describe así: la centralidad es el lugar para los habitantes ingresos altos y medios, beneficiarios de la infraestructura urbana y de servicios, mientras que la periferia y los suelos sin vocación urbana se destinan para las personas de bajos ingresos, quienes terminan incurriendo en altos costos de desplazamiento para acceder a un trabajo mejor remunerado (Tabla 16). De esta manera, “*la calidad de vida [urbana] se ha convertido en una mercancía para los que tienen dinero*” (Harvey, 2012), en un entorno de escasez, frustrante, violento y contaminado (Díaz, 2012), que, a su vez, son factores determinantes en el metabolismo urbano.



5.6. Relación de las actividades económicas con el metabolismo urbano de la ZMT

5.6.1. Las actividades económicas con relación a la generación de RSU

El sector industrial ha contribuido en el PBT entre el 1% y 2.3% durante el periodo de estudio⁷¹, siendo motor del crecimiento de la ZMT. Su demanda de grandes cantidades de materia y energía no produce significativos volúmenes de RSU (Figura 39), demostrando que este sector optimiza la transformación de sus recursos, motivado principalmente por el tema de costos. Por su parte, el sector de servicios y comercio presenta una mayor correlación entre el PBT y los RSU generados, principalmente por las actividades restauranteras, bares y comida rápida (Figura 40)⁷². La mayor correlación en la generación de basuras se presenta en el sector doméstico (Figura 41).

El análisis estadístico de correlación con base en el R^2 indica que a mayor número de viviendas existe un mayor número de toneladas generadas de RSU en la ZMT⁷³, concretamente las personas que habitan en ellas; quienes regularmente sucumben ante la lógica del consumismo, más cuando se ha institucionalizado días en el calendario de compras masivas a un aparente bajo precio, pero un alto costo, como por ejemplo el “Hot Sale”, el “Buen Fin”⁷⁴, el “Blue Monday”, el “Black Friday”, etc.

⁷¹ Datos para el Estado de México (GEM, 2020).

⁷² El restaurante “Norte Sur” de Toluca genera alrededor de 1 tonelada de RSU por semana. Esta información fue obtenida en entrevista con el equipo de seguridad de dicho lugar. Asimismo, otros servicios privados, como hospitales, escuelas y los propios centros comerciales contratan sus servicios de limpia, lo que significa que los ayuntamientos delegan su responsabilidad a éstas (Iglesias, 2007).

⁷³ El R^2 para las actividades secundarias fue de 0.004, para las terciarias se alcanzó de 0.014, para el sector vivienda de 0.007.

⁷⁴ Evento organizado entre el Gobierno Federal y Asociaciones de Empresas de México parecido al “Black Friday” en noviembre de cada año, cuyo objetivo es “impulsar el mercado interno, motivar el consumo y beneficiar al consumidor final con los precios “más bajos” del año en diversos bienes y servicios”. (Campos y Medina, 2017)



Figura 39. Correlación del PBT Sec. y la generación de RSU

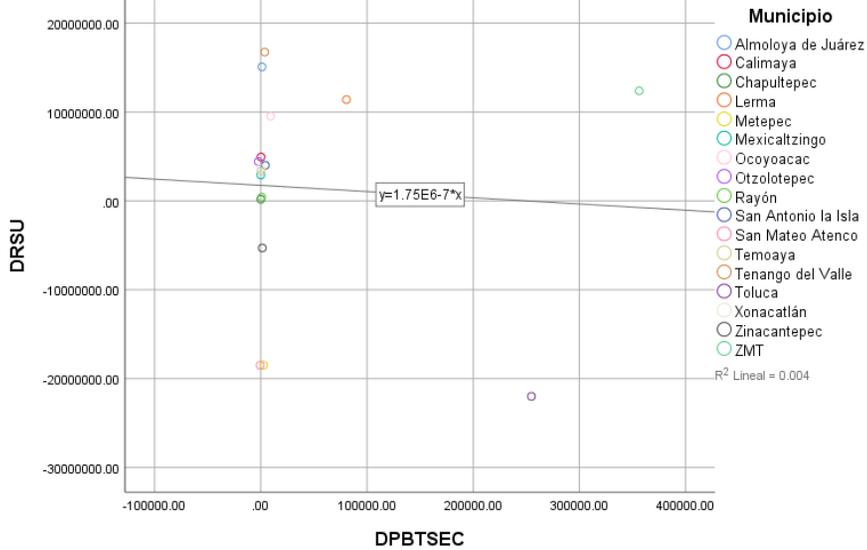


Figura 40. Correlación del PBT Ter. y la generación de RSU en la ZMT

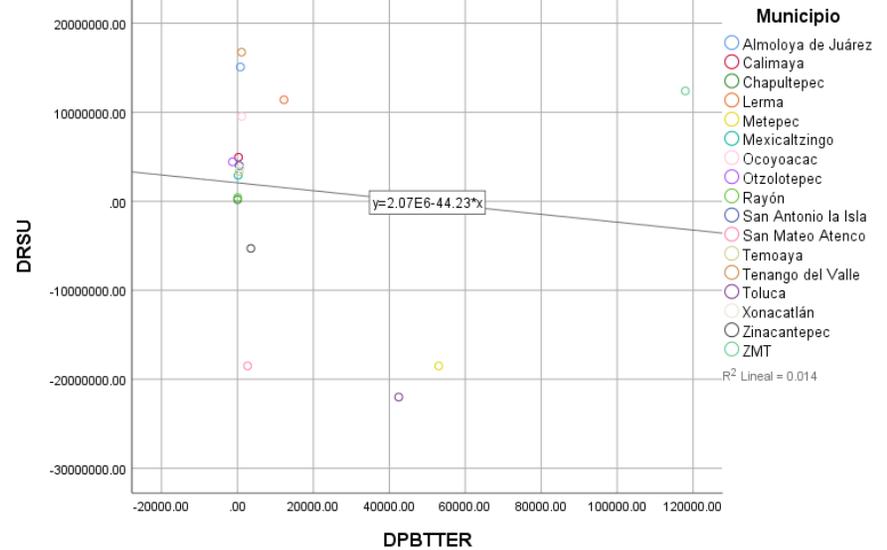
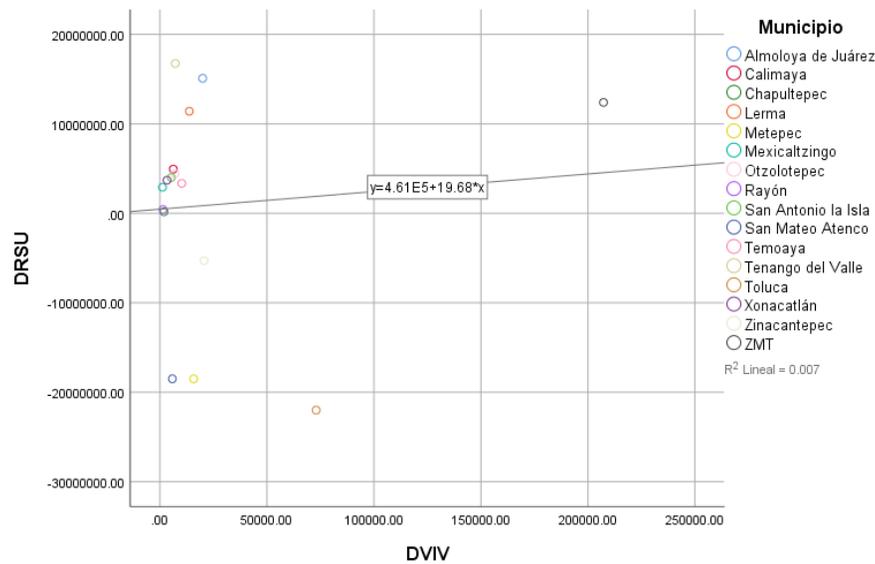


Figura 41. Correlación del Número de viviendas. y la generación de RSU



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)



5.6.2. Las actividades económicas con respecto al consumo y desecho de agua

El agua es un fluido de proceso y de servicio en las actividades industriales, razón por la cual existe una alta correlación entre su consumo y la participación en el PBT de este sector (Figura 42). Su leve incremento en el consumo puede atribuirse al subsector de alimentos y bebidas, que atiende la creciente demanda en la zona y del país. De igual manera, el sector terciario presenta una clara correlación positiva con el consumo y el PBT, dado el crecimiento acelerado de las actividades restauranteras y de esparcimiento (Figura 43).

Sin embargo, la mayor correlación identificada entre consumo de agua y PBT corresponde al sector vivienda⁷⁵ (Figura 44), toda vez, que la normativa establece que cualquier proyecto nuevo debe garantizar el servicio de agua potable; convirtiendo el vital líquido en un bien inmerso en una lógica de mercado, que para el caso de la ZMT es libremente explotado, altamente dependiente del Sistema Cutzamala, y subvalorado en cuanto a estructura de costos y precios se refiere, reflejados en cuotas anuales irrisorias.

La deficiente valoración económica del agua, la desigualdad en el acceso, las débiles políticas sobre el manejo y regulación de ésta, al igual que la pobre aplicación de las leyes; sumado a los problemas técnicos enunciados, evidencian la enorme insostenibilidad de la ZMT con relación al agua.

⁷⁵ El R2 para las actividades secundarias fue de 0.880, para el sector terciario fue de 0.865 y para el ramo de vivienda correspondió a 0.997.



Figura 42. Correlación entre el PBT Sec. y el consumo de agua

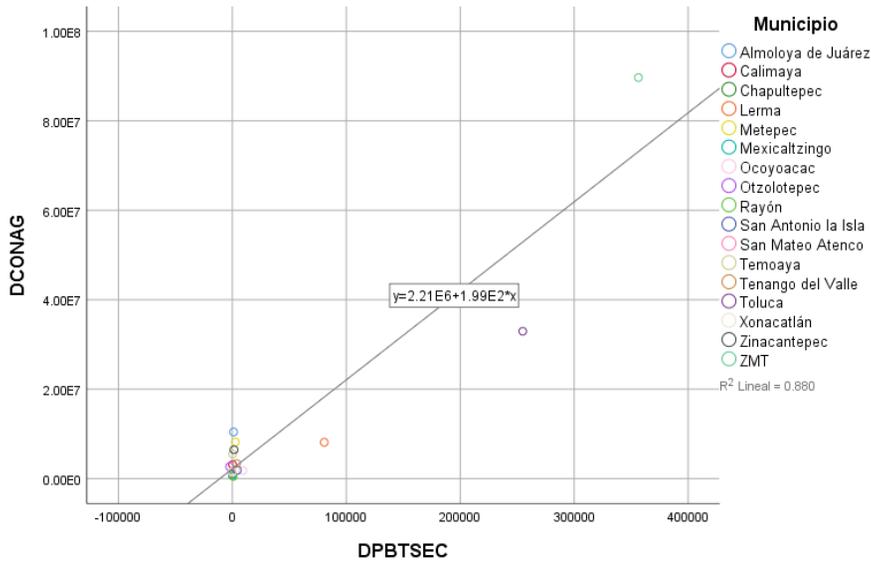


Figura 43. Correlación entre el PBT Ter. y el consumo de agua

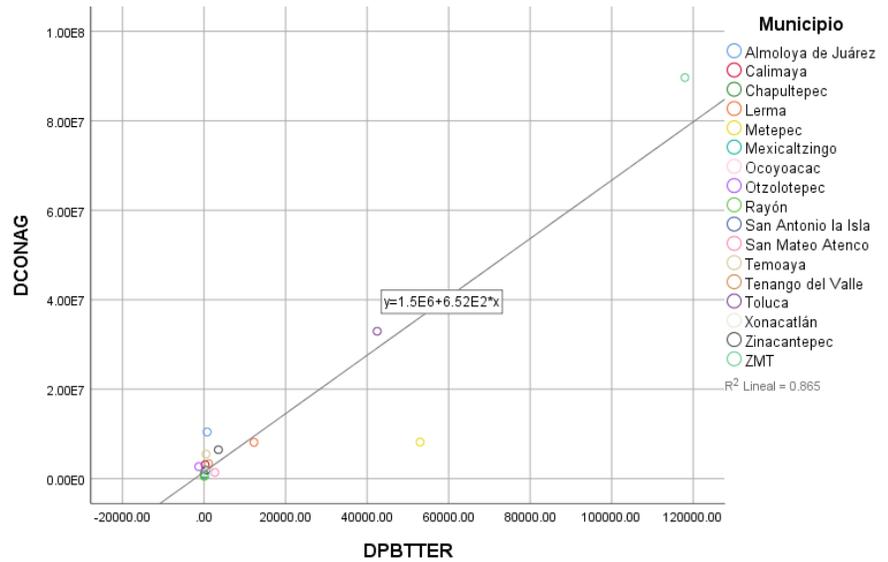
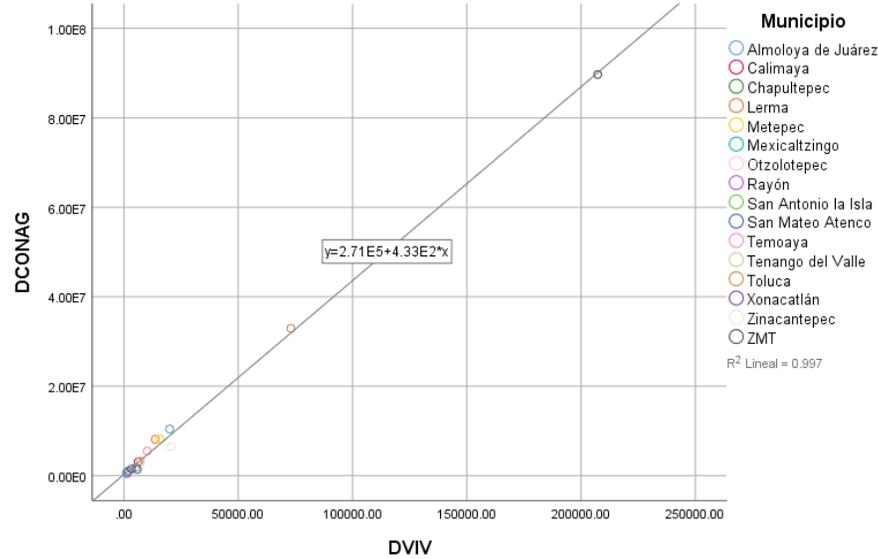


Figura 44. Correlación del Número de viviendas y el consumo de agua



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)



En relación con el volumen de descargas de aguas residuales, tanto las actividades económicas como el número de viviendas muestran una correlación alta⁷⁶ pero con una pendiente estadística negativa (Figuras 45, 46 y 47), la cual se puede explicar por la clandestinidad de muchas descargas fuera de la red de drenaje; que se evidencia la contaminación de todos los cuerpos superficiales del vital líquido en al ZMT y que a su vez, representa un riesgo de salud pública⁷⁷.

5.6.3. Las actividades económicas en relación con el número de vehículos

En la ZMT existe una alta correlación positiva⁷⁸ entre las actividades económicas, el número de viviendas y el número de automóviles que circulan en ella (Figuras 48, 49 y 50), lo que evidencia: 1) un incremento en el parque vehicular proporcional a los sectores industria y comercio, 2) una alta necesidad de desplazamiento de los habitantes desde las periferias para llegar a sus destinos de trabajo o de convivencia social, 3) un servicio de transporte público inseguro e ineficiente, que ha propiciado la necesidad de desplazarse de manera particular, 4) un imaginario colectivo del vehículo como *statu quo* y símbolo de libertad (Mendezcarlo, 2019).

⁷⁶ El R^2 para las actividades secundarias es de 0.907; para las terciarias es de 0.821 y para las viviendas fue de 0.982.

⁷⁷ El caso de los niños “azules” por exceso de nitratos presente en los pozos de agua para consumo de acuerdo con la Dra. Verónica Miranda Martínez (Notimex, 2019).

⁷⁸ El R^2 para las actividades secundarias es de 0.913 y para las terciarias de 0.909, ambas con respecto al uso del automóvil. La correlación entre el número viviendas y el parque vehicular es de $R^2= 0.982$.



Figura 45. Correlación entre PBT Sec con las Aguas Residuales

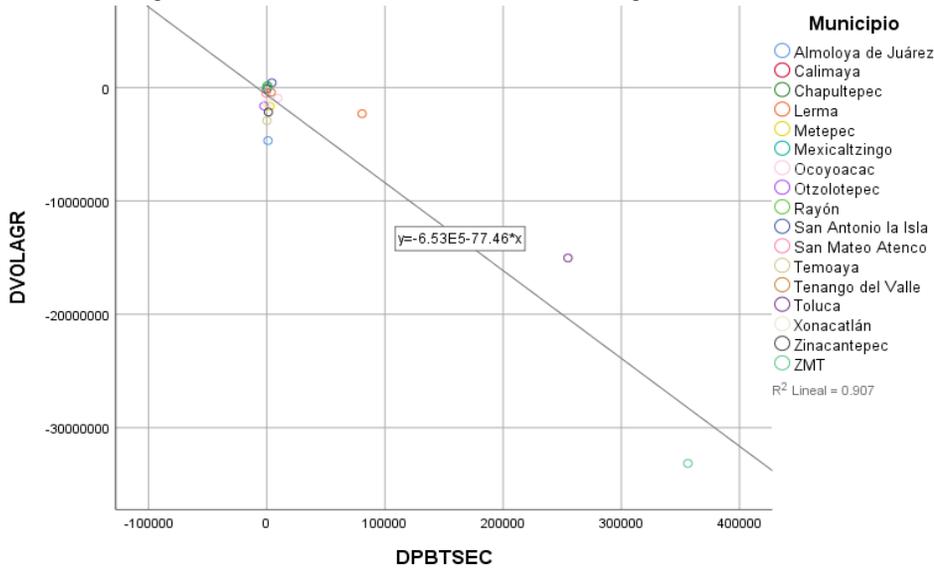


Figura 46. Correlación entre PBT Ter con las Aguas Residuales

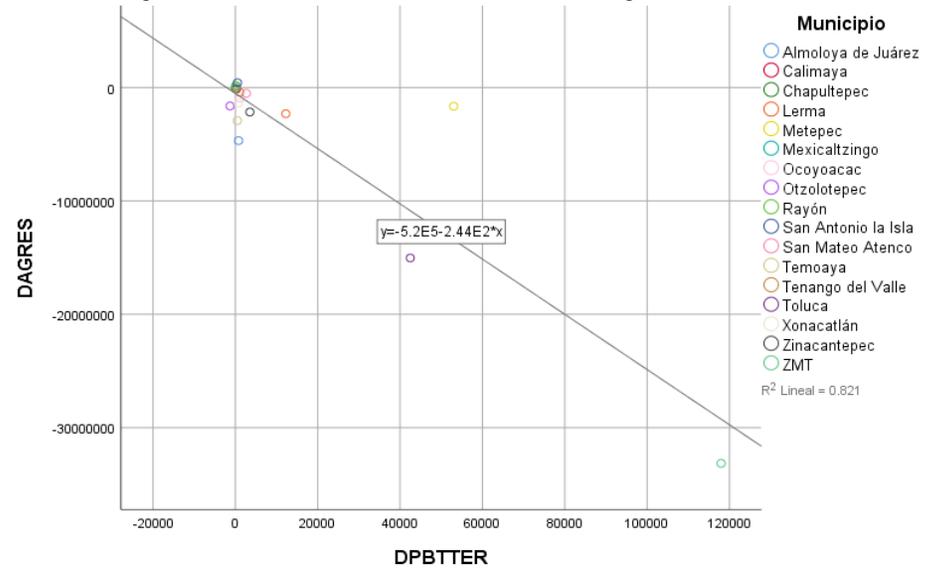
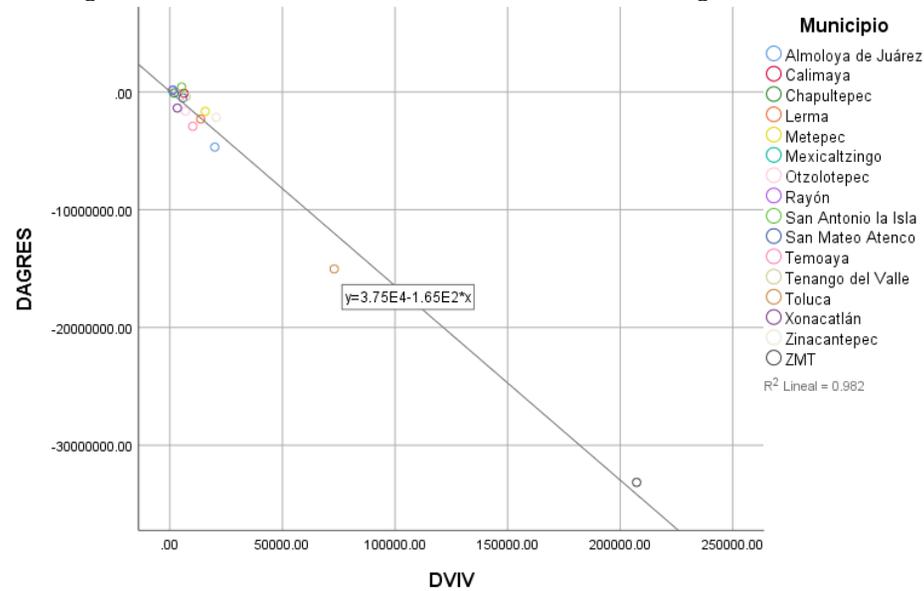


Figura 47. Correlación entre número de viviendas con las Aguas Residuales



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)



Figura 48. Correlación del PBT Sec. y número de vehículos

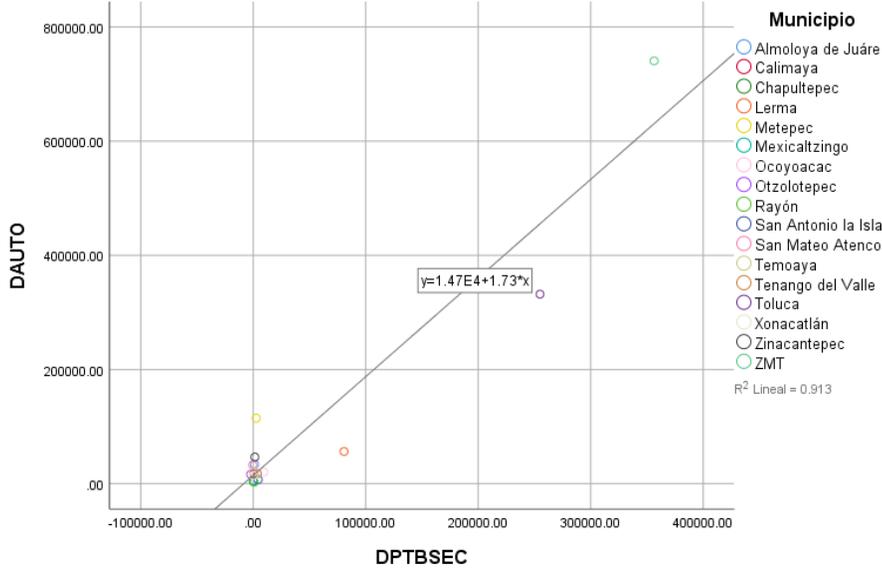


Figura 49. Correlación del PBT Ter. y número de vehículos

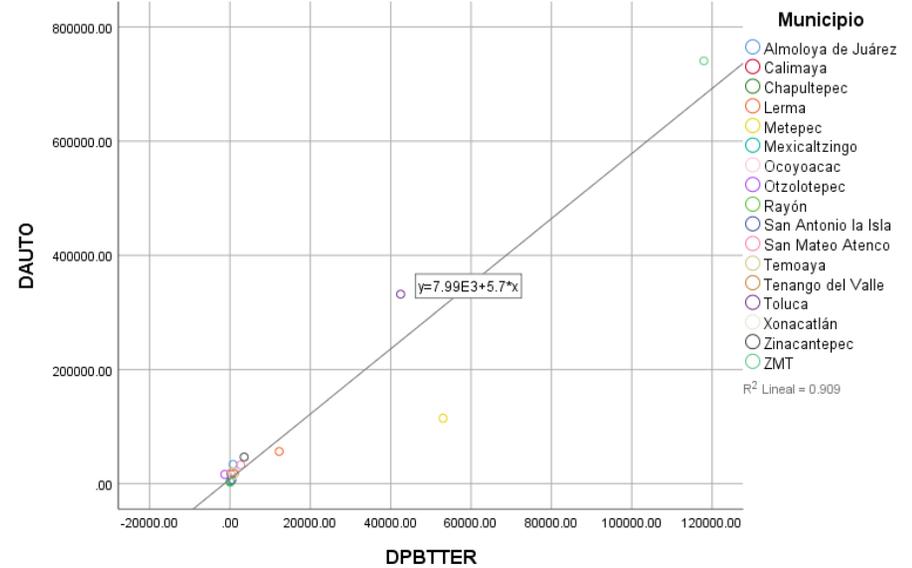
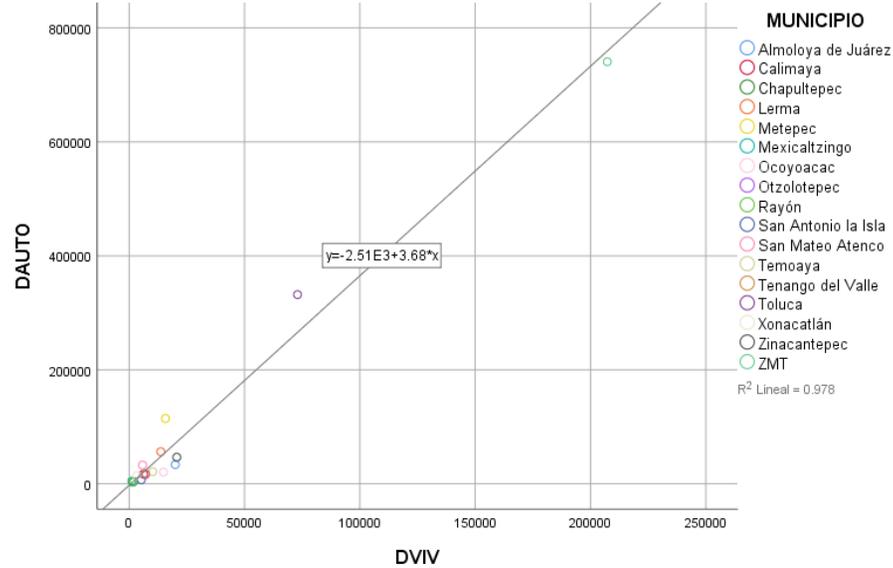


Figura 50. Correlación del número de vivienda y el número de vehículos



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)



5.7. Índices metabólicos de la ZMT

Como se mencionó en el Capítulo 4 de la Metodología, los índices son “una medida estadística que permite la comparación de una magnitud simple o compleja de dos situaciones diferentes con respecto al tiempo o espacio, tomando a una de ellas como referencia” (de la Fuente, nd) que, para el caso de este trabajo, se crearon con el nombre de **Índices Metabólicos**, que ponderaran el balance metabólico (entradas, consumos y salidas) de cada municipio de la ZMT, con la finalidad de ser comparados entre ellos y con otras ciudades, como línea base para estudios futuros.

La construcción de los índices fue a partir del Análisis de Componentes Principales (ACP), que es una técnica multivariante que permite un tratamiento de las variables, para reducirlas y sintetizarlas para formar un nuevo grupo de datos independientes de los originales (Bernal *et al.*, nd). De acuerdo con cada municipio de la ZMT, se determinaron 16 valores, que para su interpretación se empleó la técnica semaforización establecida por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2013), dividiendo los datos en cuatro rangos⁷⁹: a) **verde** para aquellos municipios con bajos consumos (metabolismo bajo); b) **amarillo**, para aquellos con un metabolismo medio bajo; c) **naranja**, cuando el metabolismo es medio alto y d) **rojo** para los municipios con grandes consumos de materia y energía; valores presentados en la **Tabla 28** y representados geográficamente en las Figuras 51 y 52.

Tabla 28. Índices Metabólicos de la ZMT.

Municipio	Índice 2000	Ranking del índice	Valor del IM	Municipio	Índice 2017	Ranking del índice	Valor de IM
Zinacantepec	-1.1	1	1	Almoloya de Juárez	-1.336	1	1
Otzolotepec	-0.99	2	1	Zinacantepec	-1.303	2	1
Xonacatlán	-0.9	3	1	Otzolotepec	-1.055	3	1
Almoloya de Juárez	-0.72	4	1	Chapultepec	-0.901	4	1
San Antonio la Isla	-0.59	5	2	San Antonio la Isla	-0.734	5	2

⁷⁹ Es importante señalar que los valores de cada municipio en cada año de estudio no es posible homogenizarlos, razón por la cual se determinó usar la técnica de la semaforización.



Municipio	Índice 2000	Ranking del índice	Valor del IM	Municipio	Índice 2017	Ranking del índice	Valor de IM
Rayón	-0.44	6	2	Xonacatlán	-0.588	6	2
Calimaya	-0.29	7	2	Calimaya	-0.509	7	2
Temoaya	-0.28	8	2	Temoaya	-0.076	8	2
San Mateo Atenco	-0.15	9	3	Rayón	0.065	9	3
Tenango del Valle	-0.13	10	3	Mexicaltzingo	0.432	10	3
Chapultepec	-0.1	11	3	Ocoyoacac	0.559	11	3
Mexicaltzingo	0.09	12	3	San Mateo Atenco	0.653	12	3
Ocoyoacac	0.18	13	4	Toluca	0.669	13	4
Toluca	1.36	14	4	Metepec	0.818	14	4
Metepec	1.43	15	4	Tenango del Valle	0.971	15	4
Lerma	2.61	16	4	Lerma	2.335	16	4

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

A partir del índice metabólico y su representación espacial (Figuras 49 y 50) se puede afirmar lo siguiente:

- Los municipios con mayor participación económica y aportación al PBT en el 2017 son Toluca, Metepec, Lerma y Tenango del Valle, lo que se refleja en un índice metabólico crítico, es decir, su IM es de 4.
- La urbanización intensiva se está dirigiendo principalmente al sur y este de la centralidad, afectando a los municipios de San Mateo Atenco, Calimaya, Mexicaltzingo, San Antonio la Isla, Rayón, Ocoyoacac, Chapultepec, los cuales son los municipios afectados por la desecación de las ciénegas del acuífero del Valle de Toluca y cuyas áreas son empleadas para la construcción de zonas habitacionales, por lo que presentan un IM de 3
- Al norte como al oeste, los municipios de Zinacantepec, Almoloya de Juárez, Temoaya, Oztolotepec y Xonacatlán mantienen índices metabólicos en los rangos “bajo” y “bajo medio”, es decir, un IM de 1 y 2, porque han mantenido sus actividades primarias, la urbanización está contenida en las cabeceras municipales, existe mayor espacio boscoso y las tradiciones rurales se sostienen.



Figura 51. Índice Metabólico por ranking de la ZMT (2000)

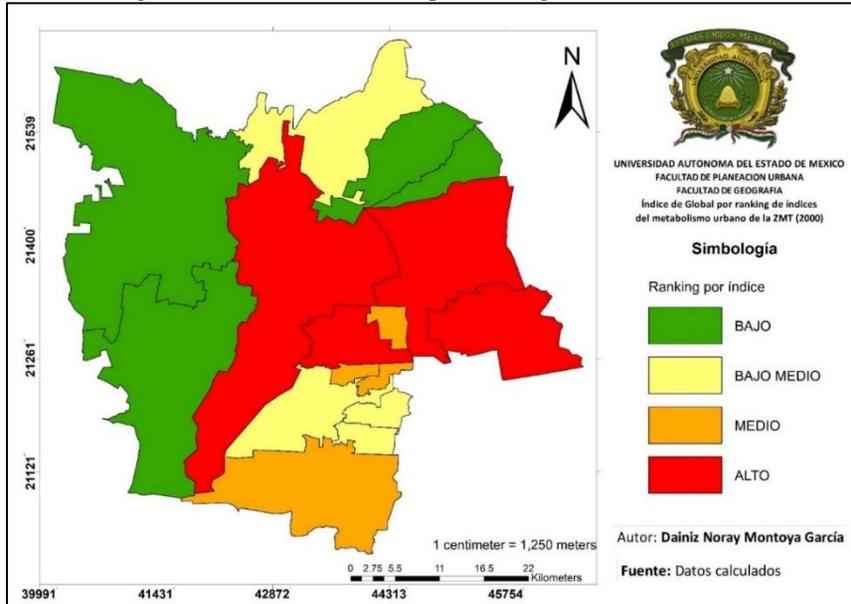
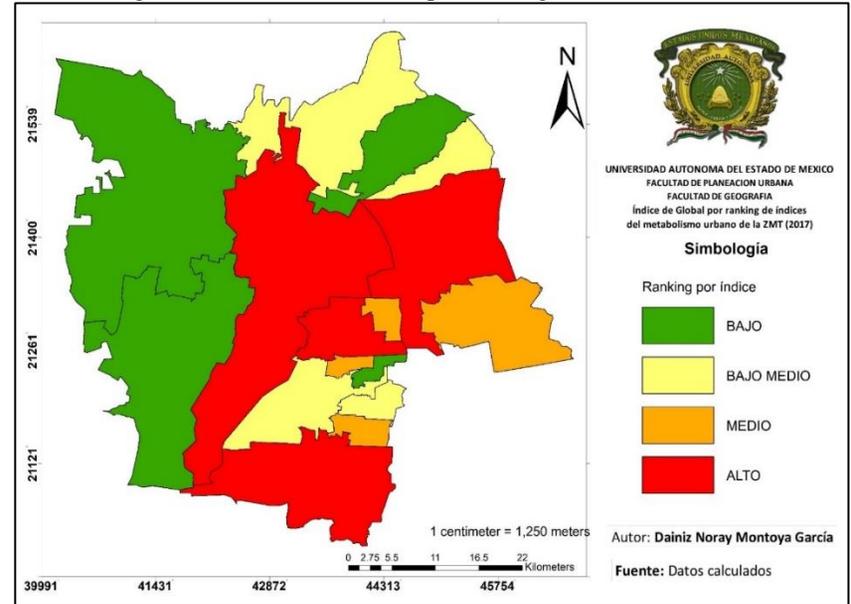


Figura 52. Índice Metabólico por ranking de la ZMT (2017)



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)



Luego del análisis y obtención de datos de consumos de electricidad doméstica y de las actividades comerciales e industriales, de combustibles para el parque vehicular particular y público y de agua potable como entradas a la máquina térmica compleja de la ZMT; de determinar la productividad agrícola y el cálculo del número de automóviles de la zona, así como del PBT de los sectores secundario y terciario, como parte de la dinámica económica; y calcular las emisiones indirectas de CO₂-eq asociadas al consumo de electricidad, de emisiones de CO₂-eq por la quema de combustibles del parque vehicular, la estimación del volumen de aguas residuales y las toneladas residuos sólidos urbanos; y habiendo integrado esta información en los Índices Metabólicos (constructo y herramienta nueva), se afirma que la ZMT es insostenible desde el punto de vista ambiental, es inequitativa en los consumos presentando una alta heterogeneidad entre los municipios de la periferia y la centralidad, y está riesgo de colapso de no revertirse el modelo de consumo reinante.



CAPÍTULO 6. POTENCIAL COLAPSO DE LA ZMT

6.1. Señales de Colapso

A partir del estudio metabólico y sus Índices, y el isomorfismo de la ZMT como máquina térmica compleja, se puede decir que existen algunas condiciones⁸⁰ que pueden llevarla al colapso:

1. **El deterioro ambiental**, reflejado en la contaminación de los cuerpos de agua, de la tierra, las frecuentes contingencias ambientales; la generación residuos sólidos, la creciente dependencia hídrica al Sistema Cutzamala; aunado a los intensivos cambios de uso de suelo y las actividades económicas.
2. **Los cambios en el clima local**, evidenciados en la isla de calor de Toluca (Morales *et al.*, 2007), en los cambios micro climáticos que han modificado los ciclos de las lluvias y sequías (Vilchis y Garrocho, 2018) y que han afectado la productividad de alimentos y la disponibilidad de agua para diferentes usos.
3. **El aumento de la población, del aumento del consumo y la disminución en la disponibilidad de recursos materiales y energéticos** (Malthus, 1798 en Díaz, 2020; Meadows *et al.*, 2012; Rockström *et al.*, 2009) mostrado actualmente en la pérdida de la capacidad de carga de la ZMT y los ecosistemas circundantes; que cada vez menos pueden proveer los insumos y energía exosomática necesarios para sus habitantes (Cuadro 1), aumentado su dependencia más allá del Valle de Toluca, y exacerbando su vulnerabilidad ante cualquier variación.

⁸⁰ Las condiciones 1, 2, 3, 5 y 6 son expuestas por Diamond (2006), las demás son condiciones propuestas por la autora.



4. **Las Pandemias y crisis sanitarias;** el caso más reciente, la COVID-19, considerado como efecto de las actividades antrópicas sobre el medio ambiente; que modificó radicalmente los patrones conductuales de las ciudades con el aislamiento social y el cierre de actividades económicas; pero sobre todo, que puso en evidencia la debilidad e incapacidad de la gobernabilidad urbana ante la crisis (mundial y de la ZMT) en un contexto de insostenibilidad, de profundas desigualdades económicas y sociales, y de una morfología urbana incapaz de solventar las necesidades de salubridad (Olivera, 2020).

5. **La alta dependencia al exterior en una mala interpretación de la globalización,** ya que la ZMT se ha internacionalizado en aspectos estructurales (como la cultura, la información, la educación, la comunicación, la políticas públicas y los sectores económicos) que la mantienen cohesionada y dependiente a decisiones de organismos externos, de la banca multilateral y de las fuerzas del mercado haciéndola vulnerable; al mismo tiempo, al desvanecerse su frontera agrícola, el asentamiento empieza a configurarse, en lo que Sassen (2011) denomina procesos de metropolización, caracterizada por la dispersión de sus integrantes, pero con una estrecha interconexión, que ha homogenizado su paisaje urbano.

6. **La incapacidad de las autoridades y la población para responder a los problemas antes mencionados.** La cultura y con ello, el estilo de gobernanza que se viven en la ZMT han sido determinados por políticas impuestas desde el exterior fundamentadas en el imaginario del crecimiento ilimitado; quedando expresado en los planes de urbanismo, la gestión y el estilo de vida de sus habitantes; por lo que no está contemplado (hasta el momento) en la administración de la ZMT la regulación de sus flujos metabólicos junto con el respeto a sus propios límites homeostáticos. Tampoco, no se incluye en los planes educativos el conocimiento de la gestión de recursos a través de las Leyes de la Termodinámica, lo hace poco probable que la población comprenda el impacto de su huella ecológica y esté dispuesta a cambiar su estilo de vida.



6.2 La necesidad de un cambio

Ante lo expuesto, es evidente que en la ZMT se viene presentando una anomalía (en términos de Kuhn, 2006) desde finales del Siglo XX, que se expresa en la crisis ecológica, ambiental y social; por eso resulta **imprescindible** la sustitución del paradigma dominante del consumo como expresión del bienestar, por uno que dé respuesta a los problemas actuales de orden planetario (Morín, 2017; Kuhn, 2006), siendo el principal para esta investigación, el colapso urbano. Para ello, se enuncian brevemente algunas recomendaciones para ser desarrolladas en futuras investigaciones:

1. **Cambiar profundamente los valores actuales urbanos;** Latouche (2009) sostiene que “*el imaginario dominante es sistémico*”, por ende, para cambiarlo, es indispensable poner en duda su sustento y con ello los valores dominantes de los habitantes urbanos. Reconceptualizar la dimensión del tiempo, el espacio, la vida, la muerte, la cooperación, el sentido de la existencia, el desarrollo, el progreso, el crecimiento, la riqueza y pobreza, la naturaleza; de tal forma que la ciudad no se centre únicamente en viabilizar mercados, sino que privilegie el buen vivir.
2. **Descolonizar la mentalidad** (Latouche, 2009). Es necesario una transformación en la organización psicosocial de los habitantes de la ZMT desde edades tempranas, que históricamente han sido sometidas a través: a) de una amplia manipulación mediática que induce al consumismo por medio de emociones, valores, e ideas preconcebidas y neuromarketing (Lipovetsky, 2013), bajo una enfermedad de publicidad vista en calles y medios de comunicación; y b) de un mercado educativo que segrega en función de la capacidad económica, cuyos planes de estudio aniquilan la creatividad, fragmentan el espíritu e instrumentalizan a las jóvenes mentes al servicio del mercado (Illich, 2015). Urge una revolución educativa enfocada a formar individuos de pensamiento crítico, en libertad, fomentado en la responsabilidad, la espiritualidad, la



racionalidad en el consumo, la ciencia y en la comprensión y respeto hacia la naturaleza⁸¹.

3. **Operar la ciudad dentro de su capacidad de carga.** Una población autocontrolada en sus tasas de natalidad, consciente de su huella ecológica, hídrica y de carbono, podrá garantizar una mejor calidad de vida individual y comunitaria, gestionar de manera más eficiente los flujos metabólicos y la capacidad de carga de los ecosistemas de la ZMT y los alrededores.
4. **Gestionar y cuantificar la entropía,** para ello, es imperante hacer estudios metabólicos para cambiar la relación metabólica de la ZMT con sus ecosistemas y hacer más eficientes todos los procesos de extracción, transformación, consumo y desecho. (Díaz y Pulecio, 2016) y aplicar la economía circular para tratar de disminuir los residuos generados.
5. **Replantear las políticas públicas de urbanismo.** Es un imperativo categórico que las políticas públicas incluyan los conceptos de metabolismo, teoría general de sistemas, economía ecológica, termodinámica y entropía. Los gestores de política y tomadores de decisión reconozcan la infalibilidad de las leyes y principios naturales como la conservación de materia y energía (Díaz y Pulecio, 2016).
6. **Modificaciones políticas en la movilidad e infraestructura urbana.** La ciudad Latinoamérica está diseñada a favor del automóvil, lo que la hace altamente entrópica, por ello, deben implementarse cambios en las políticas y diseño urbano que lleven a un transporte público más eficiente y seguro, que desalienten el uso del vehículo particular (como ya se hace en Europa), al tiempo, que se tracen viales que incentiven el uso de la bicicleta y el tránsito peatonal. Asimismo, la infraestructura urbana actual contribuye en sus diseños, a un mayor gasto de materiales y de energía, por ende, se debe recurrir a diseños que sustenten en energías no convencionales, que permitan la captación de

⁸¹ Los modelos educativos para ello son el Montessori y el Waldorf. Además, un ejemplo mexicano (Zapoteco) de educación alternativa es la “Comunalidad”, que se fundamenta en la organización comunitaria horizontal y en un férreo respeto a la vida (Martínez Luna, 2010).



agua, la regulación hídrica, la recarga de los mantos freáticos, disminuyan la generación de desechos en su construcción y que se integre con la naturaleza para tener el acceso a servicios ambientales.

- 7. Descentralización de servicios y actividades económicas y la relocalización de éstas.** Los municipios centrales concentran la mayor parte de las actividades económicas y sociales, por tanto, generan inequidades en el acceso y uso; por ello, el relocalizar en cada municipio de la ZMT los servicios de educación, salubridad, seguridad, financieros y recreativos de calidad, reducirá los desplazamientos y la vulnerabilidad de las zonas periféricas. Esto puede mejorar la calidad de vida para la población y la recuperación de tradiciones ancestrales.
- 8. Privilegiar el consumo local ante productos importados.** Para disminuir la entropía y hacer más eficientes los flujos metabólicos, es necesario considerar que la ZMT vuelva a producir buena parte de los bienes y servicios que actualmente sus habitantes consumen; lo que reduciría la huella ecológica, hídrica y de carbono, a la vez que permitiría recuperar prácticas agrícolas parcialmente extintas y algunos saberes ancestrales.
- 9. Redistribuir los tiempos de trabajo y esparcimiento** (Latouche, 2009). El modelo económico imperante determina que se debe “trabajar más para tener más”, sin embargo, esto ha deteriorado la calidad de buena parte de la población de la ZMT, principalmente aquella que vive en las periferias y áreas deprimidas de la centralidad; con el agravante de que ahora se trabaja por menos. Por ello, políticas como El Buen Vivir o el cumplimiento estricto de los códigos laborales⁸² podrían permitir el esparcimiento, el ocio y el disfrute en familia de los trabajadores.
- 10. Replantear y reestablecer relaciones con la naturaleza y conocimientos ancestrales (Buen Vivir).** Es indispensable recuperar los conocimientos ancestrales, donde la Pacha Mama tiene derechos y no está al servicio del hombre, revivir la importancia del trabajo

⁸² Artículo 123 constitucional que establece 8 horas obligatorias de trabajo.



DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

colectivo y comunitario ante el disfrute de los recursos naturales, la complementariedad del ser humano con sus semejantes y el entorno. Esto se puede llevar a cabo desde las comunidades de base en los barrios y colonias de cada municipio.



CONCLUSIONES

1.- La ZMT puede ser considerada desde la termodinámica como una máquina térmica urbana, con un alto consumo en formas de materia y energía bajo una lógica insostenible de metabolismo lineal; con relaciones inequitativas y desiguales entre las zonas periféricas con bajo poder adquisitivo y escasez en ofertas de bienes y servicios, y la centralidad de los municipios de Toluca, Lerma y Metepec.

2.-La máquina térmica urbana de la ZMT se caracteriza por ser desordenada, dispersa y termodinámicamente ineficiente, situación similar que se presenta en otras áreas metropolitanas y capitales latinoamericanas.

3.- La metodología propuesta para la evaluación del metabolismo en cada municipio de la ZMT contempló el análisis de flujos de materiales y energía (MEFA) en un contexto social, ambiental, político e histórico determinados a partir de la obtención de datos, estimaciones, cálculos, correlaciones y la aplicación del Principio de la Conservación de Materia y Energía. Además, con la creación de los Índices Metabólicos (aporte novedoso de esta investigación), se evidenció, a través de la correlación matemática, la representación geográfica y la semaforización, la heterogeneidad en los consumos y en las cargas contaminantes. Asimismo, la inequidad entre los municipios que comprenden la ZMT.

4.- El metabolismo urbano de la ZMT entre el 2000 y 2017 es lineal mostrando un incremento en los consumos energéticos (electricidad y combustibles), de consumo de agua, en el parque vehicular (principalmente el privado), en los PBT de las actividades económicas, y consecuentemente, en el incremento de emisiones de CO₂-eq, el volumen de aguas residuales y generación de RSU.

5.- Los indicadores básicos de metabolismo muestran una relación directa entre consumos agregados, la expansión de la zona metropolitana y el incremento de la población; mientras



que el consumo per cápita no, ya que para el caso de la electricidad y acceso al agua se aprecia una disminución en el tiempo; reflejando presumiblemente, inequidades de acceso a servicios básicos por razones de infraestructura y capacidad de pago. Al tiempo que los valores per cápita por volumen de agua residual y generación de basura disminuyeron, mostrando que existe una clandestinidad en la disposición de buena parte de los desechos urbanos.

6.- Desde la conformación de la ZMT, se pueden mencionar dos factores que propiciaron su metabolismo lineal actual: 1) desde lo intangible, la condición urbana actual se debe al comportamiento psicosocial de sus habitantes, sustentado en una ideología mercantilista reflejándose en el deterioro de su calidad de vida y en los altos niveles de consumo de recursos materiales y energéticos y, 2) desde lo tangible, que las políticas públicas, marcos normativos, planes de desarrollo y firmas de acuerdos internacionales conciben el mundo de una manera determinista, no acordes con la realidad compleja de la dinámica y vida urbana, reflejadas en el diseño de una zona metropolitana que beneficia a pocos a costa de muchos. La saturación y deterioro de la infraestructura, el cambio de uso de suelo sustentada en un fin mercantilista, la pérdida de áreas verdes, de zonas de reserva y la contaminación ambiental, han hecho a la ZMT vulnerable y con posibilidades de colapso.

7.- Ante la vulnerabilidad y riesgo de colapso de la ZMT, resulta imperante entonces, que las políticas y planes de urbanización incluyan los conceptos de metabolismo urbano, de la termodinámica, con énfasis en la entropía, la economía ecológica; de tal manera que la ciudad opere dentro límites homeostáticos de abasto y provisión, y su propia capacidad de carga, pues ha quedado demostrado que son la base para sostenibilidad de dicha área.

8.- Se cumplieron con los objetivos planteados en este trabajo, no obstante, necesario continuar con estudios metabólicos en la ZMT y con el perfeccionamiento de los Índices Metabólicos, para poder establecer estrategias de planeación y desarrollo urbano aplicables en la realidad y a otras zonas urbanas en futuros estudios.



ANEXOS

ANEXO 1. Balance de materiales

El balance de materiales incluye el agua, consumo de combustible y la producción de alimentos. La ecuación general es:

Ec. 1.

$$\text{Consumo Materiales} = \text{Materiales}_{\text{entrada}} - \text{Materiales}_{\text{salida}}$$

En el caso del agua, se tomaron en cuenta con base en la disponibilidad de datos, que la ZMT tiene suministro de agua a partir del Sistema Cutzamala y de los pozos profundos distribuidos en todos los subsistemas.

Ec. 2.

$$\text{Consumo Agua (CA)} = \text{Agua}_{\text{Entrada}} - A_{\text{residual}}(\text{AR}) - \text{Pérdidas}$$

Ec. 2.1

$$CA = (\text{Sistema Cutzamala} + \text{Pozos Profundos} + \text{Precipitación Pluvial}) - AR - \text{Pérdidas}$$

El balance de agua incluye el suministro del Sistema Cutzamala que abastece a la Ciudad de Toluca (CONAGUA, 2005), los pozos de agua que abastecen a todos los municipios, incluyendo la capital mexiquense y la precipitación pluvial. Mientras que las salidas incluyen las aguas residuales que son vertidas a ríos y el tratamiento de agua residuales.

En el caso del consumo de combustible, se hicieron balances en torno a la masa de combustible por año (tonelada por año). Estas fueron estimaciones obtenidas a partir del



número de vehículos que circularon en la ZMT en el periodo de estudio. Asimismo, los datos de contaminación atmosférica se obtuvieron a partir de las estimaciones de combustible previamente hechas y se expresaron en Toneladas de CO₂-eq.

Ec. 3

$$\text{Consumo combustible} = (CVP + VPC) * \text{Número de vehículos} + \text{Emisiones atmosféricas}$$

En cuanto a la producción de alimentos agrícolas, se colocó dentro de las dinámicas de la ZMT, debido a que los datos presentados son lo que este sistema produce, aunque se sabe que, la zona de estudio recibe productos alimenticios de otros lugares del país y del mundo (Torres, 2011). En tanto que el volumen de residuos sólidos urbanos (RSU), correspondió a lo que llegó a los rellenos sanitarios o tiraderos.

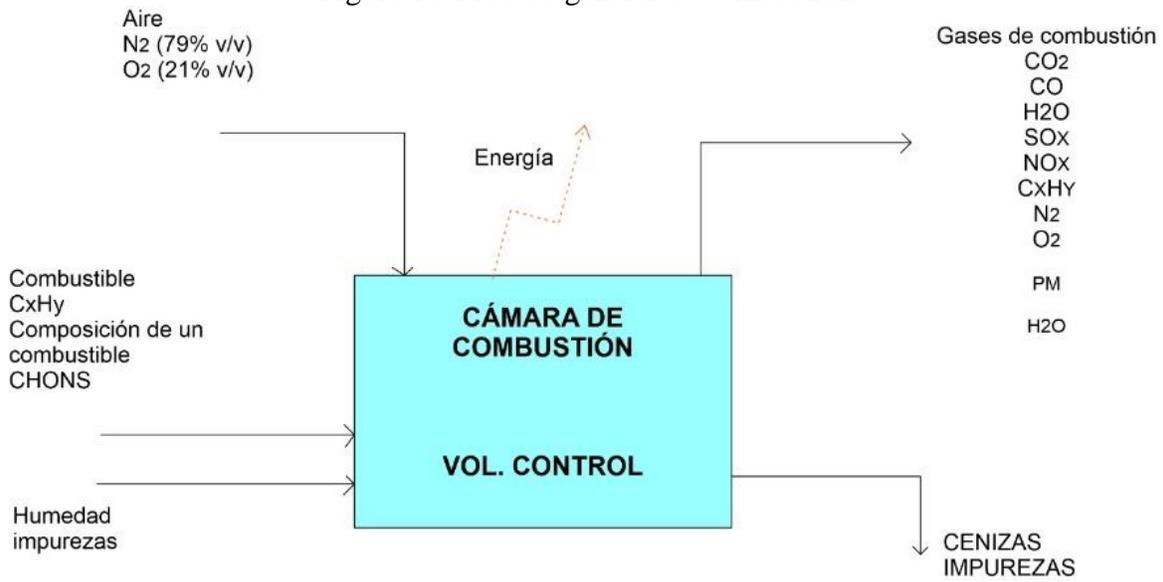
ANEXO 2. Balance de energía

En cuanto a los balances de energía, se consideraron los datos del consumo de electricidad tanto a nivel residencial como industrial y comercial, y ante ello, la cantidad de emisiones indirectas de CO₂-eq que se emiten por su generación.

En cuanto a la quema de combustible para la movilidad del parque vehicular, la cantidad de masa y energía fueron calculados a partir de ecuaciones de combustión y el parque vehicular. Con ello, se determinó la cantidad de energía que se genera a partir de este proceso y las emisiones emitidas al ambiente. El balance general de una combustión de presenta en la Figura 1a:



Figura 1a. Proceso general de combustión.



Fuente: Elaboración propia del autor (2022)



ANEXO 3. Análisis por Componentes Principales

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es un método algebraico/ estadístico que busca la sinterización de una matriz de datos y dar una estructura a la información contenida en ellos. El procedimiento consiste en homologar dicha matriz a un espacio vectorial tratando de encontrar en éste unos ejes o dimensiones que, siendo combinación lineal de las variables introducidas: 1) no se pierda la información inicial al conservar la varianza total; 2) no tengan correlación entre ellos, esto es, que sean linealmente independientes, asegurando la estructura inicial de las variables; 3) que tengas una importancia diferencial conocida en la explicación de la varianza total (Lozares y López; 1991).

El análisis de componentes principales permite el paso de un espacio vectorial R^n a un subespacio R^m ($n > m$) sin pérdida de información relevante, maximizando su varianza. El ACP calcula una matriz de autocorrelación de los datos con sus propios vectores y los ordena de acuerdo con su valor propio para que después sean normalizados. La componente se calcula por medio de un conjunto de variables originales, (x_1, x_2, \dots, x_p) siendo x un vector con p variables aleatorias:

Ec. 4

$$\alpha'_x = \alpha_{11} x_1 + \alpha_{12} x_2 + \dots + \alpha_{1p} x_p = \sum_{j=1}^p \alpha_{1j} x_j$$

Donde α'_x es la función lineal de los elementos de x de máxima varianza, y α_1 es un vector de p constantes y denota la transpuesta $\alpha_{11} x_1 + \alpha_{12} x_2 + \dots + \alpha_{1p} x_p$. El segundo componente se calcula con la $\alpha'_2 x$ incorrelacionada con α'_x . Así se eligen los componentes no correlacionados entre sí, de modos que las variables aleatorias tengan cada vez menor varianza (Tello y Díaz, 2021).



A través del ACP se realizó un análisis multivariado que permitió obtener un número escalar sintético del conjunto de indicadores para cada componente (municipio) y con ello, identificar los más significativos, que fueron estandarizados estadísticamente a través del cálculo de tasas con una media de valor 0 y con desviación estándar de 1, para que los indicadores con mayor varianza no dominen al resto.

Posteriormente, se empleó también el Análisis de Varianza Total Explicada (AVTE) con el objeto de verificar que los indicadores seccionados fueran los adecuados, señalando la proporción de variabilidad de ese grupo. Al emplear el programa SPSS versión 2.5, y al haber resultados finales, se consideró que el grupo de indicadores obtenidos es el adecuado cuando la suma acumulada del segundo componente estuvo entre el 50 % y 70% o superior (Hinojosa *et al.*, 2015).

Finalmente, para determinar cuál indicador explicaba mejor el fenómeno a analizar, en este caso el metabolismo urbano de la ZMT se tomó en cuenta la matriz de componentes, donde el criterio de selección fue que aquel indicador más adecuado es el que se acerca más a 1. En caso de que algún indicador resultara negativo, se descartó para la obtención del índice ya que no es representativo.



ANEXO 4. Metabolismo hídrico por subcomponente (municipio) del sistema ZMT

Municipio	Población (2000)	Población (2018)	Consumo agua 2000 (hm ³ /año)	Consumo agua 2016 (hm ³ /año)	Tasa per cápita (l/hab. día) 2000	Tasa per cápita (l/hab. día) 2016	Vol. Agua residual (hm ³ /Año) 1999	Vol. Agua residual (hm ³ /Año) 2010	Tasa per cápita (l/hab. día) 1999	Tasa per cápita (l/hab. día) 2010	Eficiencia 1999	Eficiencia 2010
Almoloya de Juárez	110,591	257,314	7.87	18.31	195	195	7.69	3	190.5	31.9	1.0	0.2
Calimaya	35,196	83,834	2.26	5.39	176	176	2.12	2	165.0	65.4	0.9	0.4
Chapultepec	5,735	17,790	0.50	1.56	241	241	0.5	0.4	238.9	61.6	1.0	0.3
Lerma	99,870	177,471	10.46	18.59	287	287	9.31	7	255.4	108.1	0.9	0.4
Metepec	194,463	262,603	23.35	31.53	329	329	21.65	20	305.0	208.7	0.9	0.6
Mexicaltzingo	9,225	15,625	0.94	1.59	279	279	0.88	1	261.4	175.3	0.9	0.6
Ocoyoacac	49,643	77,420	3.24	5.06	179	179	2.95	2	162.8	70.8	0.9	0.4
Otzolotepec	57,583	100,994	3.57	6.27	170	170	3.63	2	172.7	54.3	1.0	0.3
Rayón	9,024	14,539	0.80	1.29	243	243	0.83	1	252.0	188.4	1.0	0.8
San Antonio la Isla	10,321	42,036	0.61	2.50	163	163	0.58	1	154.0	65.2	0.9	0.4
San Mateo Atenco	59,647	82,817	3.61	5.02	166	166	3.51	3	161.2	99.2	1.0	0.6
Temoaya	69,306	141,809	5.26	10.77	208	208	4.92	2	194.5	38.6	0.9	0.2
Tenango del Valle	65,119	108,634	5.06	8.45	213	213	4.42	4	186.0	100.9	0.9	0.5
Toluca	666,596	1,011,149	63.75	96.70	262	262	61.03	46	250.8	124.6	1.0	0.5
Xonacatlán	41,402	65,783	2.52	4.01	167	167	2.37	1	156.8	41.6	0.9	0.2
Zinacantepec	121,850	245,775	6.36	12.83	143	143	6.16	4	138.5	44.6	1.0	0.3
ZMT	1,605,571	2,705,593	140.19	229.86	239.2	232.8	132.55	99.4	226.2	100.7	0.9	0.4

Fuente: Elaboración propia



ANEXO 5. Metabolismo del Consumo de Electricidad por subcomponente de la ZMT

Municipio	CTE (KWh/año) 2000	CTE (KWh/año) 2016	CTE (PJ) 2000	CTE (PJ) 2016	CTE per cápita (kWh/hab.año) 2000	CTE per cápita (kWh/hab.año) 2016	EMISIONES TOTALES (TonCO ₂ eq/año) 2000	EMISIONES TOTALES (TonCO ₂ eq/año) 2016	Emisiones per cápita (ton CO ₂ eq/hab.año) 2000	Emisiones per cápita (ton CO ₂ eq/hab.año) 2016	CTE per cápita (MJ/hab.año) 2000	CTE per cápita (MJ/hab.año) 2016
Almoloya de Juárez	75,729,000.0	154,252,000.0	0.3	0.6	684.8	599.5	45,763,034.7	70,647,416.0	413.8	274.6	24.7	21.6
Calimaya	45,712,000.0	29,604,000.0	0.2	0.1	1,298.8	353.1	27,623,761.6	13,558,632.0	784.9	161.7	46.8	12.7
Chapultepec	2,111,000.0	4,684,000.0	0.0	0.0	368.1	263.3	1,275,677.3	2,145,272.0	222.4	120.6	13.3	9.5
Lerma	752,736,000.0	837,051,000.0	2.7	3.0	7,537.2	4,716.6	454,878,364.8	383,369,358.0	4,554.7	2,160.2	271.3	169.8
Metepec	143,347,000.0	220,319,000.0	0.5	0.8	737.1	839.0	86,624,592.1	100,906,102.0	445.5	384.3	26.5	30.2
Mexicaltzingo	3,779,000.0	69,380,000.0	0.0	0.2	409.6	4,440.3	2,283,649.7	31,776,040.0	247.6	2,033.7	14.7	159.9
Ocoyoacac	94,844,000.0	111,915,000.0	0.3	0.4	1,910.5	1,445.6	57,314,229.2	51,257,070.0	1,154.5	662.1	68.8	52.0
Otzolotepec	8,714,000.0	12,159,000.0	0.0	0.0	151.3	120.4	5,265,870.2	5,568,822.0	91.4	55.1	5.4	4.3
Rayón	1,354,000.0	16,266,000.0	0.0	0.1	150.0	1,118.8	818,222.2	7,449,828.0	90.7	512.4	5.4	40.3
San Antonio la Isla	10,467,000.0	20,265,000.0	0.0	0.1	1,014.1	482.1	6,325,208.1	9,281,370.0	612.8	220.8	36.5	17.4
San Mateo Atenco	20,093,000.0	52,663,000.0	0.1	0.2	336.9	635.9	12,142,199.9	24,119,654.0	203.6	291.2	12.1	22.9
Temoaya	19,422,000.0	74,239,000.0	0.1	0.3	280.2	523.5	11,736,714.6	34,001,462.0	169.3	239.8	10.1	18.8
Tenango del Valle	25,930,000.0	41,947,000.0	0.1	0.2	398.2	386.1	15,669,499.0	19,211,726.0	240.6	176.8	14.3	13.9
Toluca	1,261,030,000.0	1,737,137,000.0	4.5	6.3	1,891.7	1,718.0	762,040,429.0	795,608,746.0	1,143.2	786.8	68.1	61.8
Xonacatlán	6,930,000.0	16,727,000.0	0.0	0.1	167.4	254.3	4,187,799.0	7,660,966.0	101.1	116.5	6.0	9.2
Zinacantepec	23,715,000.0	63,252,000.0	0.1	0.2	194.6	257.4	14,330,974.5	28,969,416.0	117.6	117.9	7.0	9.3
ZMT	2,495,913,000.0	3,461,860,000.0	9.0	12.5	1,554.5	1,279.5	1,508,280,225.9	1,585,531,880.0	939.4	586.0	56.0	46.1

Fuente: Elaboración propia



ANEXO 6. Consumos de agua per cápita en algunos países y la ZMT

País/Región	Consumo per cápita (l/hab. día) 2000	Consumo per cápita (l/hab. día) 2017
Estados Unidos		575
Australia		493
Italia		386
Japón		374
México		366
CDMX		320
Noruega		301
ZMT	293	232.8
Suecia		140

Fuente: Elaboración propia del autor con base en Banco Mundial (2022)

Nota: La fuente para Suecia fue: iAgua (2022)

Los datos del resto de los países fueron obtenidos de: ONU HABITAT (2021)

ANEXO 7. Consumos de electricidad per cápita en algunos países y la ZMT

País/Región	KWh/hab. año 2000	KWh/hab. año 2014
Estados Unidos	14,001.21	13,253.82
Canadá	17,037.07	15,588.48
China	992.94	3,905.31
Alemania	6,635.42	7,035.48
América Latina y Ca	1,599.86	2,157.89
México	1,800.46	2,157.32
ZMT	1,554.50	1,279.50

Fuente: Elaboración propia del autor con base en Banco Mundial (2022)

**ANEXO 8. Metabolismo de consumo de combustible de Vehículos Particulares de la ZMT en 2000**

Municipio	Población 2000	VP (2000)	CVP (m³/año) 2000	CVP (máscico) (Ton/año) 2000	Energía CVP (PJ/año) 2000	CO₂eq VP (TonCO₂ eq/año) 2000	Emisiones por VP (TonCO₂/auto) 2000	Emisiones per cápita (TonCO₂eq/hab. año) 2000	Consumo per cápita (GJ/hab. año) 2000
Almoloya de Juárez	110,591	7,505	8,775	6,406.08	0.285	19,576.97	2.61	0.177	2.58
Calimaya	35,196	2,743	3,760	2,745.04	0.122	8,388.83	3.06	0.238	3.47
Chapultepec	5,735	314	392	286.51	0.013	875.56	2.79	0.153	2.22
Lerma	99,870	11,624	15,013	10,959.76	0.488	33,493.03	2.88	0.335	4.88
Metepec	194,463	45,137	30,635	22,363.83	0.995	68,343.87	1.51	0.351	5.12
Mexicaltzingo	9,225	1,558	1,340	978.29	0.044	2,989.67	1.92	0.324	4.72
Ocoyoacac	49,643	4,761	6,879	5,021.45	0.223	15,345.54	3.22	0.309	4.50
Otzolotepec	57,583	3,310	4,471	3,263.74	0.145	9,974.00	3.01	0.173	2.52
Rayón	9,024	546	745	543.73	0.024	1,661.63	3.04	0.184	2.68
San Antonio la Isla	10,321	888	1,122	818.96	0.036	2,502.74	2.82	0.242	3.53
San Mateo Atenco	59,647	7,140	8,061	5,884.37	0.262	17,982.62	2.52	0.301	4.39
Temoaya	69,306	5,231	10,897	7,954.97	0.354	24,310.39	4.65	0.351	5.11
Tenango del Valle	65,119	5,848	10,178	7,430.18	0.331	22,706.63	3.88	0.349	5.08
Toluca	666,596	178,995	120,285	87,807.79	3.907	268,340.60	1.50	0.403	5.86
Xonacatlán	41,402	3,252	4,261	3,110.84	0.138	9,506.72	2.92	0.230	3.34
Zinacantepec	121,850	11,339	8,001	5,840.58	0.260	17,848.82	1.57	0.146	2.13
ZMT	1,605,571	290,191	234,817	171,416.11	7.628	523,847.62	1.81	0.326	4.75

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

Nota: Como importante aclaración, no se consideraron datos de la RAMA (Red Automática de Monitoreo Ambiental) debido a la falta de disponibilidad de datos. Por esta razón se optó por hacer cálculos a partir del parque vehicular de la ZMT

**ANEXO 9. Metabolismo de consumo de combustible de Vehículos Particulares de la ZMT en 2019**

Municipio	Población 2018	VP (2019)	CVP (m³/año) 2019	CVP (máscico) (Ton/año) 2019	Energía CVP (PJ/año) 2019	CO₂eq VP (TonCO₂ eq/año) 2019	Emisiones por VP (TonCO₂/auto) 2019	Emisiones per cápita (TonCO₂eq/hab. año) 2019	Consumo per cápita (GJ/hab. año) 2019
Almoloya de Juárez	257,314	41,206	48,181.35	35,172.39	1.5652	107,487	2.61	0.418	6.1
Calimaya	83,834	19,677	26,974.81	19,691.61	0.8763	60,178	3.06	0.718	10.5
Chapultepec	17,790	4,005	5,005.93	3,654.33	0.1626	11,168	2.79	0.628	9.1
Lerma	177,471	68,055	87,898.75	64,166.09	2.8554	196,092	2.88	1.105	16.1
Metepec	262,603	159,792	108,454.03	79,171.44	3.5231	241,948	1.51	0.921	13.4
Mexicaltzingo	15,625	6,346	5,458.58	3,984.76	0.1773	12,177	1.92	0.779	11.3
Ocoyoacac	77,420	25,099	36,263.04	26,472.02	1.1780	80,898	3.22	1.045	15.2
Otzolotepec	100,994	19,505	26,345.79	19,232.43	0.8558	58,774	3.01	0.582	8.5
Rayón	14,539	3,094	4,220.71	3,081.12	0.1371	9,416	3.04	0.648	9.4
San Antonio la Isla	42,036	7,889	9,966.65	7,275.65	0.3238	22,234	2.82	0.529	7.7
San Mateo Atenco	82,817	40,048	45,212.59	33,005.19	1.4687	100,864	2.52	1.218	17.7
Temoaya	141,809	26,412	55,021.48	40,165.68	1.7874	122,746	4.65	0.866	12.6
Tenango del Valle	108,634	23,503	40,906.50	29,861.75	1.3288	91,257	3.88	0.840	12.2
Toluca	1,011,149	510,910	343,331.52	250,632.01	11.1531	765,931	1.50	0.757	11.0
Xonacatlán	65,783	17,438	22,850.76	16,681.05	0.7423	50,977	2.92	0.775	11.3
Zinacantepec	245,775	57,914	40,864.12	29,830.81	1.3275	91,163	1.57	0.371	5.4
ZMT	2,705,593	1,030,893	906,956.59	662,078.31	29.4625	2,023,311	1.96	0.748	10.9

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

**ANEXO 10. Metabolismo de combustible de Vehículos Públicos y de Carga de la ZMT en 2000**

Municipio	Población 2000	VPC 2000	CVPC (m³/año) 2000	CVPC (másico) (Ton/año) 2000	Energía CVPC (PJ/año) 2000	CO₂eq VPC (TonCO₂ eq/año) 2000	Emisiones por VPC (TonCO₂/auto) 2000	Emisiones per cápita (TonCO₂eq/hab. año) 2000	Consumo per cápita (GJ/hab. año) 2000
Almoloya de Juárez	110,591.00	2,879	16,832	13,869	0.62	43,591	15.14	0.39	5.64
Calimaya	35,196.00	1,147	7,862	6,478	0.29	20,361	17.75	0.58	8.28
Chapultepec	5,735.00	61	381	314	0.01	987	16.19	0.17	2.46
Lerma	99,870.00	4,052	26,167	21,562	0.97	67,769	16.72	0.68	9.72
Metepec	194,463.00	6,348	21,543	17,751	0.80	55,792	8.79	0.29	4.11
Mexicaltzingo	9,225.00	849	3,651	3,009	0.14	9,456	11.14	1.03	14.68
Ocoyoacac	49,643.00	1,421	10,265	8,459	0.38	26,585	18.71	0.54	7.67
Otzolotepec	57,583.00	1,292	8,726	7,190	0.32	22,598	17.49	0.39	5.62
Rayón	9,024.00	171	1,166	961	0.04	3,021	17.66	0.33	4.79
San Antonio la Isla	10,321.00	296	1,870	1,541	0.07	4,842	16.36	0.47	6.72
San Mateo Atenco	59,647.00	1,833	10,347	8,526	0.38	26,797	14.62	0.45	6.43
Temoaya	69,306.00	3,193	33,258	27,405	1.23	86,133	26.98	1.24	17.79
Tenango del Valle	65,119.00	2,637	22,948	18,909	0.85	59,432	22.54	0.91	13.07
Toluca	666,596.00	40,427	135,835	111,928	5.04	351,789	8.70	0.53	7.56
Xonacatlán	41,402.00	1,611	10,555	8,698	0.39	27,336	16.97	0.66	9.45
Zinacantepec	121,850.00	3,915	13,812	11,381	0.51	35,771	9.14	0.29	4.20
ZMT	1,605,571.00	72,132	325,219	267,981	12.06	842,263	11.68	0.52	7.51

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

**ANEXO 11. Metabolismo de combustible de Vehículos Públicos y de Carga de la ZMT en 2019**

Municipio	Población 2018	VPC 2019	CVPC (m³/año) 2019	CVPC (máscico) (Ton/año) 2019	Energía CVPC (PJ/año) 2019	CO₂eq VPC (TonCO₂ eq/año) 2019	Emisiones por VPC (TonCO₂/auto) 2019	Emisiones per cápita (TonCO₂eq/hab. año) 2019	Consumo per cápita (GJ/hab. año) 2019
Almoloya de Juárez	257,314	4,937	28,863.68	23,783.67	1.07	74,752.07	15.14	0.29	4.16
Calimaya	83,834	2,254	15,449.82	12,730.65	0.57	40,012.43	17.75	0.48	6.83
Chapultepec	17,790	237	1,481.16	1,220.47	0.05	3,835.94	16.19	0.22	3.09
Lerma	177,471	10,917	70,501.11	58,092.92	2.61	182,586.04	16.72	1.03	14.73
Metepec	262,603	12,854	43,621.33	35,943.98	1.62	112,971.93	8.79	0.43	6.16
Mexicaltzingo	15,625	1,362	5,857.69	4,826.74	0.22	15,170.43	11.14	0.97	13.90
Ocoyoacac	77,420	2,574	18,594.58	15,321.93	0.69	48,156.83	18.71	0.62	8.91
Otzolotepec	100,994	2,528	17,073.10	14,068.24	0.63	44,216.46	17.49	0.44	6.27
Rayón	14,539	292	1,991.67	1,641.14	0.07	5,158.10	17.66	0.35	5.08
San Antonio la Isla	42,036	649	4,099.60	3,378.07	0.15	10,617.28	16.36	0.25	3.62
San Mateo Atenco	82,817	3,698	20,874.47	17,200.56	0.77	54,061.37	14.62	0.65	9.35
Temoaya	141,809	5,896	61,412.74	50,604.09	2.28	159,048.67	26.98	1.12	16.06
Tenango del Valle	108,634	4,989	43,416.27	35,775.01	1.61	112,440.85	22.54	1.04	14.82
Toluca	1,011,149	60,587	203,572.32	167,743.59	7.55	527,218.11	8.70	0.52	7.47
Xonacatlán	65,783	2,408	15,777.22	13,000.43	0.59	40,860.34	16.97	0.62	8.89
Zinacantepec	245,775	6,867	24,226.78	19,962.86	0.90	62,743.28	9.14	0.26	3.66
ZMT	2,705,593	123,049	576,813.53	475,294.35	21.39	1,493,850.14	12.14	0.55	7.91

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

**ANEXO 12. Metabolismo por consumo de combustible total de la ZMT en 2000**

Municipio	Población 2000	Consumo total combustible VP+VPC (Ton comb/año) 2000	Consumo total combustible VP+VPC (PJ/año) 2000	Consumo máximo VP +VPC per cápita (ton comb/hab. año) 2000	Emisiones totales VP+ VPC (TonCO₂ eq/año) 2000	Emisiones totales per cápita (TonCO₂ eq/hab. año) 2000
Almoloya de Juárez	110,591	20,275.47	0.91	0.18	63,168.46	0.57
Calimaya	35,196	9,223.32	0.41	0.26	28,750.08	0.82
Chapultepec	5,735	600.64	0.03	0.10	1,862.87	0.32
Lerma	99,870	32,521.78	1.46	0.33	101,262.44	1.01
Metepec	194,463	40,114.91	1.79	0.21	124,135.51	0.64
Mexicaltzingo	9,225	3,987.03	0.18	0.43	12,446.13	1.35
Ocoyoacac	49,643	13,480.06	0.60	0.27	41,930.95	0.84
Otzolotepec	57,583	10,453.68	0.47	0.18	32,571.97	0.57
Rayón	9,024	1,504.80	0.07	0.17	4,682.30	0.52
San Antonio la Isla	10,321	2,359.65	0.11	0.23	7,345.14	0.71
San Mateo Atenco	59,647	14,410.23	0.65	0.24	44,779.40	0.75
Temoaya	69,306	35,359.80	1.59	0.51	110,443.77	1.59
Tenango del Valle	65,119	26,339.52	1.18	0.40	82,138.68	1.26
Toluca	666,596	199,735.60	8.94	0.30	620,129.70	0.93
Xonacatlán	41,402	11,808.38	0.53	0.29	36,843.10	0.89
Zinacantepec	121,850	17,221.77	0.77	0.14	53,619.89	0.44
ZMT	1,605,571	439,396.63	19.69	0.27	1,366,110.41	0.85

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)

**ANEXO 13. Metabolismo por consumo de combustible total de la ZMT en 2019**

Municipio	Población 2019	Consumo total combustible VP+VPC (Ton comb/año) 2019	Consumo total combustible VP+VPC (PJ/año) 2019	Consumo másico VP +VPC per cápita (ton comb/hab. año) 2019	Emisiones totales VP+VPC (TonCO₂ eq/año) 2019	Emisiones totales per cápita (TonCO₂ eq/hab. año) 2019	Incremento emisiones entre 2000 y 2019 (TonCO₂eq/hab. año)	Incremento consumo entre 2000 y 2019 (Ton comb/hab. año)
Almoloya de Juárez	257,314	58,956.06	2.64	0.23	182,238.89	0.71	23.99	24.97
Calimaya	83,834	32,422.26	1.45	0.39	100,189.99	1.20	46.30	47.58
Chapultepec	17,790	4,874.80	0.22	0.27	15,003.57	0.84	159.64	161.64
Lerma	177,471	122,259.00	5.47	0.69	378,677.60	2.13	110.44	111.55
Metepec	262,603	115,115.42	5.14	0.44	354,919.85	1.35	111.72	112.50
Mexicaltzingo	15,625	8,811.50	0.39	0.56	27,347.86	1.75	29.73	30.48
Ocoyoacac	77,420	41,793.95	1.87	0.54	129,055.31	1.67	97.35	98.80
Otzolotepec	100,994	33,300.66	1.49	0.33	102,990.77	1.02	80.28	81.63
Rayón	14,539	4,722.26	0.21	0.32	14,574.00	1.00	93.19	94.78
San Antonio la Isla	42,036	10,653.73	0.48	0.25	32,851.68	0.78	9.81	10.85
San Mateo Atenco	82,817	50,205.75	2.24	0.61	154,925.23	1.87	149.18	150.93
Temoaya	141,809	90,769.77	4.06	0.64	281,794.98	1.99	24.70	25.46
Tenango del Valle	108,634	65,636.76	2.94	0.60	203,698.35	1.88	48.66	49.38
Toluca	1,011,149	418,375.60	18.70	0.41	1,293,149.53	1.28	37.47	38.09
Xonacatlán	65,783	29,681.48	1.33	0.45	91,837.63	1.40	56.88	58.20
Zinacantepec	245,775	49,793.67	2.23	0.20	153,906.22	0.63	42.30	43.35
ZMT	2,705,593	1,137,372.66	50.85	0.42	3,517,161.46	1.30	52.78	53.61

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)



ANEXO 14. Emisiones de CO₂eq per cápita en algunas regiones del mundo y la ZMT

País/Región	ton met.CO₂/per cápita 2000	ton met.CO₂/per cápita 2016
Canadá	17.41	15.09
China	2.69	7.17
Alemania	10.09	8.84
América Latina	2.6	2.92
Estados Unidos	19.9	15.45
México	4.03	3.94
ZMT	0.85	1.3

Fuente: Elaboración propia del autor con base al Banco Mundial (2022)



ANEXO 15. Producción agrícola de la ZMT

Municipio	Producción agrícola (ton/año) 2000	Producción agrícola (Ton/ año) 2017	Tasa prod. per cápita (kg/hab. año) 2000	Tasa prod. per cápita (kg/hab. año) 2017
Almoloya de Juárez	91,940	229,250	831.35	890.94
Calimaya	33,195	58,310	943.14	695.54
Chapultepec	2,270	4,090	395.77	229.90
Lerma	23,960	42,711	239.91	240.66
Metepec	14,913	12,295	76.69	46.82
Mexicaltzingo	2,245	4,362	243.38	279.19
Ocoyoacac	12,504	14,976	251.88	193.44
Otzolotepec	18,097	32,698	314.28	323.77
Rayón	14,348	18,546	1589.97	1275.62
San Antonio la Isla	9,156	18,688	887.08	444.58
San Mateo Atenco	1,603	3,102	26.87	37.46
Temoaya	36,777	62,628	530.65	441.64
Tenango del Valle	400,483	678,104	6150.02	6242.09
Toluca	69,247	97,034	103.88	95.96
Xonacatlán	13,012	28,980	314.29	440.54
Zinacantepec	40,476	62,368	332.18	253.76
ZMT	784,226	1,368,144	488.44	505.67

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)



ANEXO 16. Producción agrícola en algunas entidades federativas del país y la ZMT

Entidad federativa	Ton/año 2000	Ton/año 2017
Edo Mex	42,058,077	62,304,571
Sinaloa	9,711,660	12,226,044
Chiapas	5,840,154	9,239,700
San Luis P	5,567,298	11,252,026
Michoacán	88,437,909	120,057,416
CDMX	3,513,961	18,068,488
ZMT	784,226	1,368,144

Fuente: Elaboración propia del autor con base en la SIAP (ND)



ANEXO 17. Volumen de RSU emitidos en la ZMT

Municipio	Vol. RSU vertidos a rellenos sanitarios (Kg/año) 2002	Vol. RSU vertidos a rellenos sanitarios (Kg/año) 2015	Vol. RSU vertidos a rellenos sanitarios (Kg/día) 2002	Vol. RSU vertidos a rellenos sanitarios (Kg/día) 2015	Kg/hab. * día 2000	Kg/hab. * día 2015
Almoloya de Juárez	2,920,000	18,000,000	8,000.0	49,315.1	0.07	0.19
Calimaya	16,060,000	21,000,000	44,000.0	57,534.2	1.25	0.69
Chapultepec	1,820,000	2,000,000	4,986.3	5,479.5	0.87	0.31
Lerma	14,600,000	26,000,000	40,000.0	71,232.9	0.40	0.40
Metepec	109,500,000	91,000,000	300,000.0	249,315.1	1.54	0.95
Mexicaltzingo	1,090,000	4,000,000	2,986.3	10,958.9	0.32	0.70
Ocoyoacac	5,470,000	15,000,000	14,986.3	41,095.9	0.30	0.53
Otzolotepec	6,570,000	11,000,000	18,000.0	30,137.0	0.31	0.30
Rayón	1,580,000	2,000,000	4,328.8	5,479.5	0.48	0.38
San Antonio la Isla	1,000,000	5,000,000	2,739.7	13,698.6	0.27	0.33
San Mateo Atenco	36,500,000	18,000,000	100,000.0	49,315.1	1.68	0.60
Temoaya	3,650,000	7,000,000	10,000.0	19,178.1	0.14	0.14
Tenango del Valle	18,250,000	35,000,000	50,000.0	95,890.4	0.77	0.88
Toluca	292,000,000	270,000,000	800,000.0	739,726.0	1.20	0.73
Xonacatlán	7,300,000	11,000,000	20,000.0	30,137.0	0.48	0.46
Zinacantepec	29,300,000	24,000,000	80,274.0	65,753.4	0.66	0.27
ZMT	547,610,000	560,000,000	1,500,301.4	1,534,246.6	0.93	0.57

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)



ANEXO 18. RSU generados per cápita en algunas regiones del mundo y la ZMT

País/Región	kg/hab. día 2000	kg/hab. día 2017
Canadá		2.21
Estados Unidos		2.21
Europa y Asia central		1.18
Latinoamérica		0.99
ZMT	0.93	0.56
Sudáfrica		0.52

Fuente: Elaboración propia del autor con base en Kaza, *et al.*, (2018)



ANEXO 19. PBT en la ZMT

Municipio	PBT Sec. (mill pesos) 2004	PBT Sec. (mill pesos) 2009	PBT Sec. (mill pesos) 2014	PBT Sec. (mill pesos) 2018	PBT Ter (mill pesos) 2004	PBT Ter (mill pesos) 2009	PBT Ter (mill pesos) 2014	PBT Ter (mill pesos) 2018
Almoloya de Juárez	887.43	752.14	887.43	1,546.96	530.02	174.12	510.83	925.21
Calimaya	71.69	68.25	71.69	255.93	150.38	89.07	157.49	350.23
Chapultepec	6.03	3.78	6.03	14.67	87.08	13.68	89.02	53.11
Lerma	54,590.23	34,775.92	54,590.23	94,759.59	5,428.13	2,233.89	5,548.11	13,258.92
Metepc	2,928.92	1,435.44	2,928.92	3,166.66	11,481.05	7,603.29	11,481.05	57,216.77
Mexicaltzingo	27.21	25.18	27.21	65.04	104.00	56.92	104.00	208.87
Ocoyoacac	6,260.70	8,644.49	6,260.70	13,908.95	549.90	297.32	549.90	1,791.31
Otzolotepec	74.09	61.39	74.09	144.44	160.74	125.54	171.73	358.37
Rayón	435.21	467.33	435.21	859.61	31.20	13.71	31.50	62.96
San Antonio la Isla	2,914.27	1,347.61	2,914.27	4,809.11	31.67	56.10	31.67	537.26
San Mateo Atenco	411.61	7,247.11	411.61	3,100.54	822.37	1,146.81	938.46	3,441.25
Temoaya	58.90	36.40	58.90	249.47	277.70	137.72	291.09	600.52
Tenango del Valle	1,221.81	775.65	1,221.81	4,478.87	723.49	480.85	813.96	1,415.80
Toluca	188,629.91	156,141.01	188,629.91	332,976.02	43,223.33	25,329.10	43,896.97	59,877.23
Xonacatlán	94.22	94.11	94.22	161.75	435.99	207.62	435.99	865.01
Zinacantepec	929.04	3,394.08	929.04	3,835.71	1,857.84	1,071.01	1,857.84	4,199.13
ZMT	259,541.27	215,269.87	259,541.27	464,333.33	65,894.89	39,036.74	66,909.62	145,161.94

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)



ANEXO 20. PBT del Sector Inmobiliario de la ZMT

Municipio	Sector Inmobiliario (mil de pesos)			
	2004	2009	2014	2018
Almoloya de Juárez	1.989	0.983	1.989	3.186
Calimaya	2.219	2.376	2.219	3.035
Chapultepec	0.334	0	0.334	0
Lerma	110.41	33.081	110.41	273.229
Metepec	105.394	150.96	105.394	372.753
Mexicaltzingo	1.716	0.788	1.716	0.266
Ocoyoacac	5.236	5.866	5.236	0
Otzolotepec	4.221	5.018	4.221	4.336
Rayón	0.308	0.539	0.308	1.126
San Antonio la Isla	0.726	0	0.726	2.321
San Mateo Atenco	14.058	63.848	14.058	220.527
Temoaya	70.342	1.669	70.342	9.062
Tenango del Valle	3.917	6.686	3.917	7.887
Toluca	503.19	359.754	503.19	1101.926
Xonacatlán	4.131	4.161	4.131	9.34
Zinacantepec	0	9.461	0	158.711
ZMT	828.191	645.19	828.191	2167.705

Fuente: Elaboración propia del autor (2022)



ANEXO 21. Artículo enviado y aceptado a la Revista “Quivera” UAEMEX



Universidad Autónoma del Estado de México

Toluca, México, 05 de diciembre de 2022.

DAINIZ NORAY MONTOYA GARCÍA
SALVADOR ADAME MARTÍNEZ
EDEL G. CADENA VARGAS
VERÓNICA MARTÍNEZ MIRANDA
CRISTIÁN JULIÁN DÍAZ ALVAREZ

PRESENTE S

El que suscribe, Dr. en C. A. Carlos Alberto Pérez Ramírez, Director Editorial de *Quivera Revista de Estudios Territoriales* (E-ISSN 2594-102X), órgano de difusión científica de la Universidad Autónoma del Estado de México, la cual se encuentra registrada en los siguientes servicios de indización y bases de datos: Redalyc, Latindex Catálogo 2.0, CLASE, REDIB, Sherpa Romeo, LatinREV, MIAR y ERIHPLUS, comunica a usted que su artículo intitulado **“Metabolismo Urbano de los municipios de Toluca y Metepec, Estado de México, México”** ha sido evaluado mediante el mecanismo de pares a doble ciego y ha sido **ACEPTADO PARA SU PUBLICACIÓN**, razón por la cual se incorporará al proceso de edición.

Sin más por el momento y agradeciendo su valiosa colaboración, reciban un cordial saludo.

Atentamente

“2022, Celebración de los 195 Años de la Apertura de las Clases en el Instituto Literario”



DR. EN C.A. CARLOS ALBERTO PÉREZ RAMÍREZ
DIRECTOR EDITORIAL DE LA REVISTA QUIVERA

c.c.p. Archivo





ANEXO 22. Artículo enviado y aceptado a la Revista “REVIDEC”

The screenshot shows a Gmail interface with a search bar at the top. The email is titled "[revibec] Decisão editorial" and is from Junior Garcia, sent on March 27, 2022. The subject line includes a "Recibidos" tag. The email content is in Portuguese and discusses the acceptance of an article for the journal REVIDEC. The sender's bio is provided at the bottom of the email.

Buscar en el correo electrónico

9 de 74

[revibec] Decisão editorial Recibidos x

Junior Garcia a través de redibec.org
para mí, Cristian

mar, 27 dic 2022, 14:07

portugués > español Traducir mensaje Desactivar para: portugués x

Dainiz Noray Montoya García, Salvador Adame Martínez, Edel G. Cadena Vargas, Verónica Martínez Miranda, Cristian Julián Díaz Álvarez ,

Foi tomada uma decisão sobre o artigo submetido à revista REVIDEC - REVISTA IBEROAMERICANA DE ECONOMIA ECOLÓGICA, "Metabolismo energético de la Zona Metropolitana de Toluca, México".

A decisão é: submissão aceita conforme avaliação dos editores.

O artigo será encaminhado para a revisão duplo-cega por pares.

Atenciosamente,

Peter May

Casado, pai de dois filhos, embaixador do Parent in Science, professor do Curso de Graduação em Ciências Econômicas e do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Econômico (PPGDE) do Departamento de Economia da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Bacharel em Ciências Econômicas, mestrado em Desenvolvimento Econômico Agrícola e Agrário (IE/Unicamp, 2007) e doutorado em Desenvolvimento Econômico Espaço e Meio Ambiente (IE/Unicamp, 2012). Coordenador do Grupo de Estudos em Macroeconomia Ecológica (www.gemaeco.ufpr.br) e diretor da regional sul da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica - ECOECO (www.ecoeco.org.br). Foi diretor executivo da ECOECO nas funções de Tesoureiro (2018-2019) e vice-presidência (2020-2021). Áreas de interesse: (macro)economia ecológica, economia agrária e agrícola e desenvolvimento sustentável.



BIBLIOGRAFÍA

- Abler, R., Adams, J., Gould, P. (1972). *Spatial organization. The geographer's view of the world*. Prentice Hall. Londres.
- Adame, S.; Sánchez, R., y Hoyos, G. (2020). Factores socioterritoriales de cambio de uso de suelo en el centro de México. Caso oriente de la Zona Metropolitana de Toluca, México. *Revista Universitaria de Geografía*. 29, 1: 156-183.
- Adame, S., Hoyos, G., Sánchez, R., Campos, E. (2020b). *Impactos territoriales y ambientales de la periurbanización en la Zona Metropolitana de Toluca*. Proyecto de Investigación. Clave de registro ante la SIEA: 4780/2019CIB. UAEMEX.
- Agua y Saneamiento de Toluca. (2019). *Bóveda del Río Verdiguél*. <https://www.ayst.gob.mx/portal2/bovedarioverdiguél-historia/>
- Agua. (2022). *Ranking del Agua en Europa 2020*. <https://www.iagua.es/noticias/locken/ranking-agua-europa-2020>
- Alanís, J (2013). *Antología Histórica de Toluca*. Instituto Municipal de Cultura y Arte. H. Ayuntamiento de Toluca.
- Albores, B. (1995). *Tules y Sirenas. El impacto ecológico y cultural de la industrialización en el Alto Lerma – Toluca Estado de México*. Colegio Mexiquense. 1era. Edición.
- Álvarez, C. (2021). *La gigantesca contaminación del río Lerma Santiago*. Diario Contra Réplica. 09 diciembre. <https://www.contrareplica.mx/nota-La-gigantesca-contaminacion-del-rio-Lerma-Santiago202181210>
- Aranda, J. M. (2000). *Conformación de la Zona Metropolitana de Toluca, 1960-1990*. Universidad Autónoma del Estado de México. 1ra Edición.
- Aranda, J. (2005). Terciarización y precarización del trabajo en la Zona Metropolitana de Toluca, 1980-2000. *Papeles de Población*. Vol 11, (46), 109-137.
- Arrojo, P. (2006). *El reto ético de la Nueva Cultura del Agua. Funciones, Valores y Derechos en Juegos*. Editorial Paidós. España.
- Azpeitia, C., Adame, S. y Sánchez, R. (2016). Ruido ambiental y su relación con vehículos de Transporte urbano en el centro histórico de Toluca, Estado de México. [21° encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México, 15- 18 noviembre, AMECIDER, TIM].
- Baccini, P., Brunner, P. (2012). *Metabolism of the Anthroposphere*. Analysis, Evaluation, Desing. 2nd Edition. The MIT Press. England.
- Ballesteros, M. y Rotter, C. (2014). *Análisis de la contaminación del aire en los municipios de Toluca, Metepec, San Mateo Atenco y Zinacantepec a través de la metodología de simulación bajo el método de Montecarlo 2000-2020*. [Tesis de Licenciatura, Facultad de Economía, UAEMEX].
- Banco Mundial (2018). What a Waste 2.0
- Banco Mundial. (2022). *Población total mundial*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL>
- Banco Mundial. (2022). *Consumo de energía eléctrica (kWh/per cápita)* Datos de 2014. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.PC>
- Banco Mundial (2022). *Emisiones de CO2 (toneladas métricas per cápita)*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PC>
- Barkin, D. (1991). *“El Desarrollo Distorsionado: La integración de México a la economía mundial”*. Siglo XXI Editores. UAM Xochimilco. 1era. Edición.
- Barles, S. (2009). Urban metabolism of Paris and its region. *Journal of Industrial Ecology*. Vol 13 (6). <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00169.x>
- Barles, S. (2010). Society, energy and materials: the contribution of urban metabolism studies to sustainable urban development issues. *Journal of Environmental Planning and Management*, Vol. 53, 439-455. <https://doi.org/10.1080/09640561003703772>
- Bastida, M. C. (2016). *Más allá del Sistema Lerma. La disputa por el agua en el Valle de Toluca*. CONACYT. México. <https://patrimoniobiocultural.com/producto/mas-alla-del-sistema-lerma/>
- Bettini, V. (1998). *Elementos de la ecología urbana*. Madrid, Editorial Trotta.



- Banco Interamericano de Desarrollo (2013). *Anexo 2. Indicadores de la iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles*. Guía Metodológica. https://issuu.com/ciudadesemergentesysostenibles/docs/anexo_2_-_indicadores_ices
- Boccolini, S. (2016). El evento urbano. La ciudad como un sistema complejo lejos del equilibrio. *Revista del área de estudios urbanos del Instituto de Investigaciones Gino Germani de la Facultad de Ciencias Sociales (UBA)*. (6). <https://publicaciones.sociales.uba.ar/index.php/quid16/article/view/2073>
- Bostanci, S. (2019). Critical thinking about urban studies linked with Thermodynamics terms. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 618 (1): 012078. DOI:[10.1088/1757-899X/618/1/012078](https://doi.org/10.1088/1757-899X/618/1/012078)
- Bristow, D. y Kennedy, C. (2013) Maximizing the use of energy in cities using a open systems network approach. *Ecological Modelling*. 250: 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.11.005>
- Broto, V., Allen, A. y Rapoport, E. (2012). Interdisciplinary Perspectives on Urban Metabolism. *Journal of Industrial Ecology*. Volume 16, (6), 851-861. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00556.x>
- Bruner, P. H. y Rechberger, H. (2004). *Practical Handbook of Materia Flow Analysis*. NT. USA. Lewis Publishers.
- Browne, D., O'Regan, B. y Moles, R. (2012). Comparison of Energy flow accounting, energy flow metabolism ratio analysis and ecological footprint as tolos for measuring urban sustainability: A Case-study o fan Irish city-region. *Ecological Economics* 83: 97-107. [doi:10.1016/j.ecolecon.2012.08.006](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.08.006)
- Calderón, J. R.; Rosas, J. y Jiménez, P. L. (2011). Análisis de la problemática en la prestación del servicio público de limpia en el municipio de Toluca, Estado de México. *Revista Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima*. ISBN 978-607-015-4, 121-126.
- Campos, R. y Medina, E. (2017). ¿Realmente bajan los precios durante el Buen Fin? *El Trimestre Económico*. Vol. 84 (21):337-382.
- Candel, A., Satoca, J., Soler, J.B. (1984). Interpretación errónea del concepto de entropía. (Revisión del concepto de orden). *Enseñanzas de las ciencias*. Pp. 198-201.
- Carpintero, O. (2006). *La Bioeconomía de Georgescu-Roegen*. Ediciones de Intervención cultural. España.
- Carreño, C.; Zarazúa, G.; Fall, C.; Ávila, P. y Tejeda, S. (2018). Evaluación de la toxicidad de los sedimentos del curso alto del Río Lerma, México. *Rev. Int. Contaminación Ambiental*, 34 (1), 117-126. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v34n1/0188-4999-rica-34-01-117.pdf>
- Castillo, E. (2011). Problemática en torno a la construcción de parques eólicos en el Istmo de Tehuantepec. *Desarrollo Local Sostenible*. Vol. 4 (12)
- Castro, J. (2011). Perspectivas energéticas de la demanda energética global. Instituto de Planeamiento Estratégico (IPE). *Petrotecnia*. Febrero. http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-05-31_01-06-51103776.pdf
- Catton, W. (1986). Carrying capacity and the limits to freedom. *Social Ecology Sesión 1, World Congress of Sociology*. India.
- Cengel, Y., Boles, M. (2012) *Termodinámica*. McGraw Hill. 7º Edición. México.
- Centro Mario Molina (2014). *Estudio del Sistema Integral de Movilidad Sustentable para el Valle de Toluca*. SEMARNAT, GEM. <http://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2015/01/Documento-de-difusi%C3%B3n-Movilidad-Sustentable-Toluca.pdf>
- Céspedes, J. D. y Morales, T. (2018). Urban metabolism and sustainability: Precedents, genesis and research perspectives. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol.131, 216-224. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.023>
- Chang, R. (2002). *Química*. 7º Edición. McGraw Hill. Colombia.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2018). *Informe nacional del monitoreo de la eficiencia energética de México 2018*.
- Chrysoulakis, N.; Lopes, M.; San José, R.; Betham, C. S.; Jones, E. A.; Magliulo, V.; Klostermann, J. E. M.; Synnefa, A.; Mitraka, Z.; Castro, E. A.; González, A.; Vogt, R.; Vesala, T.; Spano, D.; Pigeon, G.; Freer-Smith, P.; Staszowski, T.; Hodges, N.; Mills, G. y Cartalis, C. (2013). Sustainable urban metabolism as a link between bio-physical sciences and urban planning: The BRIDGE Project. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 112, 100-117. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.12.0057>
- Cohen, J. (1995). Population and growth and the Earth's human carrying capacity. *Science* 269:346.



- Comisión Ambiental de la Megalópolis (2018). IMECA, Índice Metropolitano de la Calidad del Aire. <https://www.gob.mx/comisionambiental/es/articulos/imeca-indice-metropolitano-de-la-calidad-del-aire?idiom=es>
- Comisión Nacional del Agua (nd). Diagnóstico de Calidad del Agua de la Región Hidrológica Lerma Santiago Pacífico. Resultados de la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua, en el periodo 2012-2018.
- Comisión Nacional del Agua. (2005). *Sistema Cutzamala para millones de mexicanos*. Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala.
- Comisión Nacional del Agua. (2012). *Diagnóstico de calidad del agua de la Región Hidrológica Lerma Santiago Pacífico. Resultados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua*.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (nd). *Automovilista eficiente. Guía para el uso eficiente de la energía en el transporte*. Secretaría de Energía. México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/87979/guiaaautomovilef.pdf>
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (1917). Artículo 4. Gallardo Editores. Edición 2018.
- Cruz, F. (2021). Patrones de Expansión urbana de las megaurbes latinoamericanas en el nuevo milenio. *Eure*. Vol 47. (140): 29-49.
- Crutzen, P. (2002). Geology of mankind. *Nature*. Vol. 415 (23). <https://doi.org/10.1038/415023a>
- Decker, E., Elliot, S., Smith, F., Blake, D., Sherwood, R. (2000). Energy and Material Flow Through the Urban Ecosystem. *Annual Review. Energy Environment*. DOI: 10.1146/annurev.energy.25.1.6
- Delgado, G. C.; Campos, C. y Rentería, P. (2012). Cambio Climático y el Metabolismo Urbano de las Megaurbes Latinoamericanas. En *Hábitat Sustentable*. Vol. 2 (1), 2-25. ISSN 0719-0700. <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/409>
- Delgado G. (2012). *Metabolismo urbano y transporte*. En: Transporte, ciudad y cambio climático. México. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades. UNAM.
- Delgado, G. C. (2015). Ciudad y Buen vivir: ecología política urbana y alternativas para el bien común. En *Revista THEOMAI*. (32). [http://www.revista-theomai.unq.edu.ar/NUMERO_32/3_GianCarloDelgadoRamos_\(theo32\).pdf](http://www.revista-theomai.unq.edu.ar/NUMERO_32/3_GianCarloDelgadoRamos_(theo32).pdf)
- Delgado, G. C. (2015b). Ciudad, agua y cambio climático: una aproximación desde el metabolismo urbano. *Medio Ambiente y Urbanización*. Vol. 80 (1), 95-123. <https://www.ingentaconnect.com/content/iieal/meda/2014/00000080/00000001/art00005>
- de la Cruz Rosas, J. A. (2018). *Los problemas de la movilidad urbana en Toluca: crisis de un modelo agotado*. [Tesis de licenciatura, UAEMEX] repositorio. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/98677>
- de la Fuente, S. (nd). *Números índices. Estadística Descriptiva*. Facultad Ciencias Económicas y Empresariales. Departamento de Economía aplicada. Universidad Autónoma de Madrid.
- Derrible, S., Cheah, L., Atora, M., Yeow, L (2021). Urban Meabolism. In: Shi W., Goodchild, M.F., Batty, M., Kwan, MP., Zhang, A. (eds). *Urban Informatics. The Urban Book Series*. Springer. Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6_7
- Díaz, C. (2011). *Metabolismo de la ciudad de Bogotá: una herramienta para el análisis de la sostenibilidad ambiental urbana*. Tesis. (Magister en Medio Ambiente y Desarrollo) Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Estudios Ambientales.
- Díaz, C. (2014). Metabolismo urbano: herramienta para la sustentabilidad de las ciudades. *Interdisciplina* Vol. 2, (2), 51-70. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2014.2.46524>
- Díaz, C. (2016). Metabolismo Hídrico de Bogotá: el reto urbano de la gestión del Agua. *La pobreza del agua. Geopolítica, gobernanza y abastecimiento*. Universidad Central, Colombia.
- Díaz, C. (2018). Complejidad, Gestión y Disipación en la ciudad. Una aproximación desde la entropía. *Questionar Investigación Científica*, 6, 1: 25-36. DOI: <https://doi.org/10.29097/23461098.246>.
- Díaz, C. (2020a). Metabolismo urbano y la generación de entropía bajo escenarios coyunturales de confinamiento y desaceleración económica. En: Delgado, G. y López, D (2020). *Las ciudades ante el COVID-19: nuevas direcciones para la investigación urbana y las políticas públicas. Plataforma de Conocimiento para la transformación urbana*. DOI: 10.5281/zenodo.3894075
- Díaz, C. (2020b). *Entropía, homeostasis y metabolismo urbano: estudio de sostenibilidad ambiental de ciudades capitales en Latinoamérica*. Tesis de doctorado de la MMR Edgar Morin. Sonora, México.



- Díaz, J. y Silva, J. (2015). Análisis de flujo de materiales en sistemas humanos. Una Revisión. *Revista EIA*, Vol. 12, 149-161. <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n23/n23a14.pdf>
- Díaz, C., Pulecio, C. (2016). Metabolismo y entropía en las ciudades: análisis y gestión para la sustentabilidad. En Álvarez, L., Delgado, G., Leal, A. (2016). *Los desafíos de la Ciudad en el siglo XXI*. 1era. Edición. UNAM, México.
- Dijst, M.; Worrell, E.; Brunner, P.; Davoudi, S.; Geetman, S.; Harmsen, R.; Helbich, M.; Holtslag, A.; Kwan, M. P.; Lenz, B.; Lyons, G.; Mokhtarian, P.; Newman, P.; Perrels, A.; Carreón, J.; Thomson, G. y Zeyringer M. (2017). Exploring urban metabolism – Towards an interdisciplinary perspective. *Resources, Conservation & Recycling*. Vol. 132, 190-203. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.014>
- Dimond, J. (2006). *Colapso: por qué unas sociedades perduran y otra desaparecen*. Editorial Artes. Venezuela.
- Dinarés, M. (2014). Urban Metabolism: A review of recent literature on the subject. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*. Vol 60. (3), 551-571.
- Duvieigneaud, Denayer De Smet. (1977). L'écosystème urbs, in L'écosystème urbain bruxellois, in productivité en Belgique. *Travaux la Sect. Belge du Program. Biol. In. Bruxelles* 581-597.
- Echeverría, J. (2003). *La revolución tecnocientífica*. 1era Edición. Fondo de Cultura Económica. México.
- El Economista (2021). Inauguran planta de reciclaje en Toluca, Estado de México. *El Economista*. 15 de noviembre. <https://www.economista.com.mx/empresas/Inauguran-planta-de-reciclaje-en-Toluca-Estado-de-Mexico-20211115-0079.html>
- Espinoza, I. (2020). Toluca, novena lugar en contaminación en América Latina. *Ciencias*. Vol 3. (20). UNAM. <https://revistauniversitaria.uaemex.mx/article/view/13875>
- Esquivel, J., López, S., Expósito, J., Esteller, M. (2015). Sobreexplotación del acuífero del Valle de Toluca y su incidencia en el medio ambiente. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*. Vol 6 (12). Número especial.
- Esteva, G. (2011). Más allá del desarrollo: la buena vida. *Aportes Andinos* (28). <https://repositorio.uasb.edu.ec/handle/10644/2802>
- Estrada, J. (2003). *Introducción de agua potable y drenaje. El Caso del Programa "Seguimos en acción en Toluca de Lerdo 2000-2002"*. Tesis. Colegio de México.
- Evans, F. (1956). Ecosystema as the Basic Unit in Ecology. *Science*. Vol. 123: 1127-1128. DOI: 10.1126/science.123.3208.1127
- Faires, V. y Simmang, C. (2002). *Termodinámica*. Editorial Limusa. 8° Reimpresión. México.
- Fariña, J. y Ruíz, J. (2002) Orden, desorden y entropía en la construcción de la ciudad. *Urban. Revista del Departamento de Urbanística y Ordenamiento Territorial*. 2: 8-15.
- Filchakova, N., Robinson, D., Scartezini, J-L. (2011). Quo Vadis Thermodynamics and the city: a critical review of applications of thermodynamic methods to urban systems. *WIT Transactions on State of Art in Science and Engineering*. Vol. 51.
- Fischer-Kowalski, M. (1998). Society's Metabolism: the intellectual History of Material Flow Analysis, Part I, 1960-1970. *Journal of Industrial Ecology*. Vol 2 : 61-77.
- Fischer-Kowalski, M. y Haberl, H. (2000). El metabolismo socioeconómico. *Ecología Política*. (19), 21-34. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=153433>
- Fischer-Kowalski, M.; Krausmann, F.; Gilium, S.; Lutter, S.; Mayer, A.; Brigezu, S.; Moriguchi, Y.; Schütz, H.; Schandl, H. y Weisz, H. (2011). Methodology and Indicators of Economy-wide Material Flow Accounting. *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 15, (6), 855-876. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00366.x>
- Folarodi, G. (2001). El metabolismo con la naturaleza. *Herramienta*, Vol VI. https://www.researchgate.net/publication/304828122_El_metabolismo_con_la_naturaleza
- Forbes (2020). México es líder en generación de residuos en América Latina: ANIPAC. Junio 1. <https://www.forbes.com.mx/mexico-es-lider-en-generacion-de-residuos-en-america-latina-anipac/>
- García, E. (1987). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen*. 4ta Edición. Ediciones México. En Primo, A. (2015). Variabilidad de la Temperatura y de la Precipitación, en la Ciudad de Toluca, Estado de México. Periodo: 1970-2013. Tesis. Facultad de Planeación Urbana y Regional. UAEMEX.



- García, M. (2003). Apuntes de Economía Ecológica. Boletín Económico de ICE. (2767). https://biblioteca.hegoa.ehu.es/downloads/12710/%2Fsystem%2Fpdf%2F1567%2FApuntes_de_Economia_Ecologica.pdf
- García, F. (2010). La planeación del desarrollo regional en México (1900-2006). *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. UNAM (71):102-121.
- García, M. L.; Adame, S. y Sánchez, R. M. (2015). Expansión metropolitana de Toluca: Caso de estudio, municipio de Calimaya, México. *Quivera*, (17): 35-53.
- Garrocho, C. y Campos, J. (2007). Dinámica de la estructura policéntrica del empleo terciario en el área metropolitana de Toluca, 1994 – 2004. *Papeles de Población*. 13, 52: 109-152.
- Gaspar, N. y Orozco, M. E. (2015). Configuración terciaria de la zona metropolitana de Toluca. *Revista Bitácora Urbano Territorial* Vol. 25. (1), 9-139. <http://dx.doi.org/10.15446/bitacora.v1n25.40184>
- Georgescu-Roegen, N. (1950). The theory of choice and the constancy of Economics Laws. *Quarterly Journal of Economics* XLIV. Pp 125-138. En: Carpintero, O. (2006). *La Bioeconomía de Georgescu-Roegen*. Ediciones de Intervención cultural. España.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press. Estados Unidos.
- Giampietro, M. (2014). The scientific basis of the narrative of social and ecosystem metabolism. En: Gianpietro M.; Aspinall, R. y Ramos, J. y Bukkens, S. (2014). *Resource accounting for sustainability*. New York. Routledge.
- Giampietro, M; Mayumi, K. (2018). Unraveling the Complexity of the Jevons Paradox: The link between innovation, efficiency and sustainability. *Frontiers in Energy Research*. Vol. (6). <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00026>
- Gobierno de Colombia (2019). Estrategia nacional de economía circular. Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio. Bogotá D.C. Colombia. Presidencia de la República; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Comercio, Industria y Turismo.
- Gobierno del Estado de México (1997). *¡Claro! ...Con tu participación Aire Limpio. Programa para el Valle de Toluca 1997-2000*. <http://centro.paot.org.mx/index.php/acervo/123-libro-digital/1205-claro-con-tu-participacion-aire-limpio>
- Gobierno del Estado de México (2011). *Plan de Desarrollo Estatal 2011-2017*.
- Gobierno del Estado de México (2018). *Plan de Desarrollo Estatal 2017-2023*
- Gobierno del Estado de México (2015). Datos e indicadores de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.coneval.org.mx%2FInformes%2FPobreza%2FPobreza%2520urbana%2FPobreza_urbana_y_de_las_zonas_metropolitanas_en_Mexico.pdf&clen=6118591
- Gobierno del Estado de México (2018). *Programa Hídrico Integral del Estado de México 2017-2023*. <https://caem.edomex.gob.mx/sites/caem.edomex.gob.mx/files/AcercaCAEM/PHIEM1.pdf>
- Gobierno del Estado de México (2020). *Producto Interno Bruto Nacional y Estatal*. Secretaría de Finanzas. <https://igecem.edomex.gob.mx/sites/igecem.edomex.gob.mx/files/ArchivosPDF/Productos-Estadisticos/Indole-Economica/PIB/PIBNA2020.pdf>
- Gobierno de México. (2019). *La central termoeléctrica de Petacalco inicia operación de carbon por la terminal de minerales a granel*. <https://www.puertolazarocardenas.com.mx/plc25/noticias/1133-2019-central-termoelectrica>
- Gobierno del Estado de México. (2021). *Es EDOMÉX uno de los principales productores agrícolas en el país*. SECAMPO. <http://secampo.edomex.gob.mx/eventos-comunicados/es-edomex-uno-principales-productores-agricolas-en-el-pais>
- Gómez, M. (2021). *Manejo integral de residuos sólidos urbanos a través de basura cero en la Zona Metropolitana de Toluca*. [Tesis de licenciatura. Facultad de Planeación Urbana. UAEMEX]
- González, A. C. y Schandl, H. (2008). The biophysical perspective of a middle income economy: Material flows in México. *Ecological Economics* 68, (1-2), 317-327. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.03.013>
- González, M y Toledo, V. M. (2011). *Metabolismos, naturaleza e historia. Hacia una teoría de las transformaciones socioecológicas*. Icaria. España.



- Gordillo, G., Plassot, T. (2017). Migraciones internas: un análisis espacio-temporal del periodo 1970-2015. *Economía UNAM*. Vol. 14 (40).
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2015). *Cambio Climático 2014. Mitigación del cambio climático. Resumen para responsables de políticas*.
- Guibrunet, L.; Sanzana, M. y Castán, V. (2016). Flows, system boundaries and the politics of urban metabolism: Waste management in Mexico City and Santiago de Chile. *Geoforum*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoforum.2016.10.011>
- Gutiérrez, J. (2009). Planeación Urbana en México. Un análisis crítico sobre su proceso de evolución. *Urbano*. Vol. 12 (9), 52-63. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=19811644008>
- Gutiérrez, J. (2014). Planeación urbana: crítica y tendencias desde el campo de la Teoría. *Bitácora Urbano Territorial*. Vol 24 (1): 1-20. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74830875003>
- Gutiérrez, J. (2017). México y la Nueva Agenda Urbana. Hoja de ruta con trazos invisibles. [in]capacidades institucionales en el Estado de México. *Bitácora Urbano Territorial* (2):35-43.
- Gregor Barié, C. (2014). Nuevas narrativas constitucionales en Bolivia y Ecuador: el buen vivir y los derechos de la naturaleza. (59): 9-40. México.
- Harvey, D. (1997). *Urbanismo y desigualdad social*. Siglo XXI Editores. España
- Harvey, D. (2012). *Ciudades Rebeldes. Del derecho de la ciudad a la revolución urbana*. Ediciones Akal. España.
- Hendricks, C.; Obernosterer, R.; Müller, D.; Kytzia, S.; Baccini, P. y Brunner, P. (2000). Material flow analysis, a tool to support environmental policy decision making: case study on the city of Vienna and the Swiss lowlands. *Local Environment*. Vol 5 (3): 311-328. <https://doi.org/10.1080/13549830050134257>
- Hernández, E. (2017). *Cambio de uso de suelo; ¿Proceso de desindustrialización en la Zona industrial de Toluca? Periodo 2003-2013*. Tesis de Licenciatura. FAPUR, UAEMEX. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/67504>
- Higueras, E. (2009). La ciudad como ecosistema urbano. Extracto del libro: “*El reto de la ciudad habitable y sostenible*”. Editorial DAPP, Capítulo 2. <http://oa.upm.es/16625/1/Ecosistema.pdf>
- Hinojosa, R.; Garrocho, C. F.; Campos, J. y Campero, A. C. (2015). Pronóstico de accidentes viales en el espacio intrametropolitano de Toluca: un enfoque Bayesiano. *Revista Transportes*, Vol. 23 (2), 43-55. DOI:[10.14295/transportes.v23i2.882](https://doi.org/10.14295/transportes.v23i2.882)
- Hinojosa, R. (2017). Infraestructura urbana, factor influyente de la movilidad urbana y por consecuencia impacta en la seguridad vial, y en la salud pública de la ciudad: caso de estudio, zona metropolitana de Toluca. *Proyección* 21. Vol. XI, pp 124-144. https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/10300/21-07.pdf
- Huang, W.; Cui, S.; Masaru, Y.; Seiji, H. y Shunsuke M. (2015). Improving urban metabolism study for sustainable urban transformation. *Environmental Technology & Innovation*, Vol. 4, 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2015.04.004>
- Huang L.; Mei-Po K. (2018). Advancing analytical methods for urban metabolism studies. *Resources, Conservation & Recycling*, Vol. 132, 239-245. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.005>
- Huerta, V. (2017). Edo Mex: de los 10 con mayores problemas de hacinamiento en hogares. <https://www.elsoldetoluca.com.mx/local/edomex-de-los-10-con-mayores-problemas-de-hacinamiento-en-hogares-287169.html>
- Iglesias, D. (2007). Costos Económicos por la generación y manejo de residuos sólidos en el municipio de Toluca, Estado de México. *Equilibrio Económico*. Vol. 3, (2), 131-148.
- Iglesias, D. (2019). De la concentración a la descentralización de los parques industriales en el Estado de México, ¿alternativa de desarrollo regional? *Revista Científica EcoCiencia*. Vol 6, (5): 1-25. DOI: <https://doi.org/10.21855/ecociencia.65.280>
- Illich, I. (2015). *Obras resumidas Volumen 1*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Infante, J. (2014). El consumo de recursos en el siglo XX. Una Revisión. HALAC. Belo Horizonte, Vol. 4, (1), 5-32. <https://www.halacsolcha.org/index.php/halac/article/view/194>
- Inostroza L. (2013). El metabolismo urbano: Un sistema de apropiación de excedentes ecológicos, la transformación de la estepa patagónica en arquitectura burguesa. En: *Espacio Urbano, reconstrucción y reconfiguración territorial. México*. Universidad Autónoma del Estado de México y Universidad Autónoma Nuevo León.



- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2001). *Anuario Estadístico del Estado de México. Gobierno del Estado de México.* <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825157357>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2003). *Anuario Estadístico del Estado de México. Gobierno del Estado de México.* <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825158538>
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística (2010). *Censo de población y vivienda 2010.* <https://www.inegi.org.mx/temas/residuos/default.html#Tabulados>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2011). *Anuario Estadístico del Estado de México. Gobierno del Estado de México.* <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825002445>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2014). *PIB, cuentas nacionales. México.* <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/cn/pibe/tabulados.aspx>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2017). *Anuario Estadístico del Estado de México. Gobierno del Estado de México.* <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825094706>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2020). *Registro de Vehículos con motor en circulación. Base de datos.* https://www.inegi.org.mx/programas/vehiculosmotor/#Datos_abiertos
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2019). *Marco Geoestadístico de México.* <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#Descargas>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (nd). *Censo económico. Base de datos.* https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2019/#Datos_abiertos
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2014). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México.* SEMARNAT. <https://www.gob.mx/inecc/documentos/factores-de-emision-para-los-diferentes-tipos-de-combustible-fosiles-que-se-consumen-en-mexico>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2014). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México.* Extraído de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf
- Iracheta, A. (2013). *“México: hacia la reforma urbana”*. Colegio Mexiquense
- Jaramillo, C. (2017). *Trabajo experimental: Estudio de metabolismo urbano en la ciudad de Cuenca.* Tesis de la carrera de ingeniería ambiental. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador.
- Jiménez, P., Calderón, J., Campos, H. (2015). *Desarrollo Habitacional fragmentado y movilidad urbana en la Zona Metropolitana de Toluca.* 20° Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México. Cuernavaca, Morelos, 17-20 de noviembre. AMECIDER-CRIM, UNAM.
- Juan, J. I. (2010). *Estudios locales de cambios globales. El clima de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca, Estado de México.* 1ra Edición. UAEMEX.
- Juárez, G., Sánchez, A., Zurita, J. (2015). La crisis financiera internacional de 2008 y algunos efectos económicos sobre México. *Contaduría y Administración.* Vol. 60 (S2): 128-146.
- Kaza, S.; Yao, L.C.; Bhada-Tata, P.; Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.* Urban Development; Washington, DC: World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317> License: CC BY 3.0 IGO
- Kennedy, C., Cuddity, J., Engel Yan, J. (2008). The changing metabolism of cities. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 11, (2), 43-59. <https://doi.org/10.1162/jie.2007.1107>
- Kennedy, C.; Pincelt, S. y Bunje, P. (2011). The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environmental Pollution*, Vol. 159, (8-9), 1965-1973. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.022>
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, K., Helmunt, H., Fischer-Kowalski, M. (2009). Growth in global material use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics.* Vol. 68, 2696-2705. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.007>
- Krausmann, F.; Lauk, C.; Haas, W. y Wiedenhofer, D. (2018). From resource extraction to outflows of wastes and emission: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900-2015. *Global Environmental Change.* Vol. 52, 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003>



- Kuhn, T. (2006). *La estructura de las revoluciones científicas*. Traducción de Carlos Solís. Fondo de Cultura Económica. Tercera Edición. México.
- Latouche, S. (2009a). *La apuesta por el Decrecimiento. ¿Cómo salir del imaginario dominante?* Editorial Icaria. 2da Ed. España.
- Latouche, S. (2009). *Sobrevivir al desarrollo. De la descolonización del imaginario a la construcción de una Sociedad alternativa*. Editorial Icaria. 2da Ed. España.
- Latouche, S. (2012). *Salir de la Sociedad de consumo. Voces y Vías del decrecimiento*. Octaedro. 1era Ed. España.
- Leff, E. (2008). Decrecimiento o desconstrucción de la economía. Hacia un mundo sustentable. *Polis. Revista de la Universidad Bolivariana* Vol. 7 (21), 81-90. <https://www.scielo.cl/pdf/polis/v7n21/art05.pdf>
- Lipovetsky, G. (2007). *La felicidad paradójica*. Editorial Anagrama. México.
- Leyva, M., Arriaga, J. L. (2019). La defensa del territorio en San Francisco Xochicuautla, México, una forma contenciosa de diferencia. *Derecho y Ciencias Sociales*. Instituto de Cultura Jurídica en Sociología Jurídica. (22): 144-166.
- Livévanos, J. E.; Villar, A. J. (2015). *Transformación histórica de la Centralidad de Toluca: De la ciudad monocéntrica al espacio metropolitano policéntrico*. [20° Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México] AMECIDER, UNAM. <http://ru.iiec.unam.mx/id/eprint/3050>
- Llanes, E., Carguachi, J. y Rocha, J. (2018) Evaluación energética en un motor de combustión interna ciclo Otto de 1.6L. *Enfoque UTE*. 9, 4: 22-232. DOI:10.29019/enfoqueute.v9n4.365
- Lozares, C. y López, P. (1991). El análisis de componentes principales: aplicación al análisis de datos secundarios. *Revista de Sociología*. Vol. 37. <https://papers.uab.cat/article/view/v37-lozares-lopez-2>
- Lugo, R., Salazar, M., Zamora, J., Torres, A., Toledo, M. (2009). Análisis exergético de una central termoeléctrica. *Revista Científica*. Vol. 13 (1): 17-25.
- Luna J. (2015). El metabolismo urbano -rural del agua, actores sociales y gestión de los recursos hídricos público urbano de la ciudad de Cautla Morelos (2006 – 2013). *Revista de Geografía Espacios*, Vol. 5. (10): 43-62.
- Luhmann, N. (1998). *Sistemas sociales. Lineamientos para una teoría general*. Editorial Anthropos. España
- Maldonado, C. (2011). *Termodinámico y complejidad. Una introducción para las ciencias sociales y humanas*. Ediciones Desde Abajo. Colombia.
- Margalef, R. (1991). *Teoría de los sistemas ecológicos*. Barcelona. Publicaciones de la Universitat Barcelona. En: Vargas, E., Zúñiga, L. (2010). Tiempo y sucesión ecológica en Ramón Margalef. *Arbor. Ciencia, Pensamiento y Cultura*. (741): 163-171.
- Margalef, R. (1995). La ecología, entre la vida real y la física teórica. *Investigación y Ciencia*. Especial No. 40. España.
- Márquez, L., Pradilla, E. (2008). Desindustrialización, terciarización y estructura metropolitana: un debate conceptual necesario. *Cuadernos del CENDES*. Vol. 25 (29): 21-45.
- Martínez-Alier, J., G. Kallis, S. Veuthey; M. Walter, L. Temper. (2010). Social metabolism, ecological distribution conflicts, and valuation languages. *Ecological Economics*, Vol. 70 (2), 153-158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.09.024>
- Martínez-Alier, J. y Roca, J. (2013). *Economía Ecológica y política ambiental*. 3ra. Edición. Fondo de Cultura Económica. México.
- Martínez-Austria, P., Díaz-Delgado, C., Moeller-Chávez, C. (2019). Seguridad hídrica en México: diagnóstico general y desafíos principales. *Ingeniería del Agua*. Vol. 23 (2): 107-121. <https://doi.org/10.4995/Ia.2019.10502>
- Martínez, A.; Porcelli, A. (2016). Hacia un cambio de paradigma en el consumo: diferentes alternativas propuestas frente a los impactos de la obsolescencia programada. *RED Sociales. Revista del Departamento de Ciencias Sociales*. Vol. 03 (6): 346-395.
- Martínez Luna, J. (2010). *Eso que llaman Comunalidad*. Colección Diálogos. Pueblos originarios de Oaxaca. Secretaría de Cultura del Estado de Oaxaca.
- Massé, C., López, S., Argüello, F., Segura, G., Vilchis, I. (2018). La defensa del agua en el municipio de Toluca. *La Jornada Ecológica* <https://ecologica.jornada.com.mx/2018/07/28/la-defensa-del-agua-en-el-municipio-de-toluca-5509.html>
- Meadows, D., Randers, J., Meadows, D. (2012). *Los límites del Crecimiento*. Editorial Taurus. Argentina.



- Mejía, A., Sosa, M., Sandoval, E. (2018). El impacto de la migración en el crecimiento poblacional del Estado de México. *Papeles de Población*. Vol. 24 (97).
- Mendezcarlo, S. (2019). Vehículos, el fetichismo de las mercancías visto desde el marxismo. *Universitarios Potosinos*. (234): 12-17.
- Min Tan, L., Arbabi, H., Brockway, P., Densley Tingley, D., Mayfield, M. (2019). An ecological-thermodynamic approach to urban metabolism: Measuring resource utilization with open system network effectiveness analysis. *Applied Energy* 254. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113618>
- Montecillo, J. (2016). Rendimiento por hectárea de maíz en México: distritos de riego vs temporal. *Economía Informa* (398)
- Montoya, J. (1995). Políticas de planeación urbana en la delimitación de lo metropolitano. El caso de la Zona Metropolitana de Toluca. *Papeles de Población*. 8: 37-54.
- Morales, C., Madrigal, D. y González, L. (2007). Isla de calor en Toluca, México. *Ciencia Ergo Sum*. 14, 3: 307- 316.
- Morales, J.P. (2011). La capacidad de Carga: conceptos y usos. *Recursos y Medio Ambiente* (63): 47-53.
- Morín, E. (2017). *Introducción al pensamiento complejo*. Ed. Gedisa Mexicana. México.
- Naohiro, G., Ulhasanah, N., Kamahara, H., Hasanudin, U., Tachibana, R., y Fujie, K. (2016). Material and Energy Flow Analysis. En: Dewulf, J., De Meester, S., y Alvarenga, R. (2016). *Sustainability Assessment of Renewable-Based Products: Methods and Case Studies*. Chapter 9. Wiley Online Library. <https://doi.org/10.1002/9781118933916.ch9>
- Newman, P. (1999). Sustainability and cities: extending the metabolism model. *Landscape and Urban Planning* Vol. 44, (4), 21-226. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(99\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(99)00009-2)
- Notimex (19 junio 2019). Contaminación en agua provoca síndrome de niños azules en Toluca. Notimex [Video] Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=kAWUHLTd6U&ab_channel=NotimexTV
- Odum, E. (1971). *Fundamentals of Ecology*. W.B. Sanders. 3ra Edición. Estados Unidos. En Armenteras, D., González, T.M., Vergara, L.K., Luque, F.J., Rodríguez, N., Bonilla, M.A. (2016). Revisión del concepto de ecosistema como “unidad de la naturaleza” 80 años después de su formulación. *Ecosistemas*. Vol. 25 (1): 83-89. DOI: <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-1.12>
- Odum, H. (1988). Self-Organization, Transformity and Information. *Science*. Vol. 242: 1132-1139. DOI: [10.1126/science.242.4882.1132](https://doi.org/10.1126/science.242.4882.1132)
- Odum, E. y Barret, G. (2008). *Fundamentos de ecología*. 5ta Edición. CENGAGE Learning. México.
- Olivera, A. (2020). Globalización, urbanización y salud: impactos de la COVID-19. *Arquitectura y Urbanismo*. 41 (3). blogs.iadb.org/ciudades-sostenibles/es/
- Oparin, A. I. (2008). *El Origen de la Vida*. Grupo Editorial Tomo S.A. de C.V. México.
- Organización de las Naciones Unidas (2016). *The World's Cities in 2016*. Data Booklet. http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/the_worlds_cities_in_2016_data_booklet.pdf
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). 2018. *La agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*.
- Organización de las Naciones Unidas. UNHABITAT (2021). *Comprender las dimensiones del problema del agua*. https://onuhabitat.org.mx/index.php/comprender-las-dimensiones-del-problema-del-agua?fb_comment_id=1919706488040991_2396617700349865
- Orozco, M. E.; García, B.; Álvarez, G.; Mireles, P. (2017). Tendencias del sector agrícola, Estado de Mexico. *Revista Químera*. Año 19, 99-121. <https://core.ac.uk/download/pdf/185623112.pdf>
- Ortíz, J., Bueno, G., Arana, J. (2017). Analisis de la demanda residencial de electricidad en el Estado de México. *Economía, Sociedad y Territorio*. Vol 17 (53): 199-223.
- Parada, F. (2020). Complejidad, Caos y Entropía. O cómo entender el orden evolutivo de las ciudades. *AD. Veredes, Arquitectura Y divulgación*, (3), 28–39. Recuperado a partir de <https://veredes.es/vad/index.php/vad/article/view/119>
- Pérez, J., Némiga, X., Monroy, J., Gutiérrez, J., Balderas, M., Loik, M., Hernández, M., Camacho, J. (2010). Variaciones climáticas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca, Estado de México. *Ergo Sum*. Vol. 17 (2): 143-153.
- Pincetl, S., Bunje, P., Holmes, T. (2012). An expanded urban metabolism method: Toward a system approach for assessing urban energy processes and causes. *Landscape and Urban Planning* (107): 193-202. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.06.006>



- Prigogine, I. (1996). *El fin de las certidumbres*. Editorial Andres Bello. Chile.
- Primo, A. (2015). Variabilidad de la Temperatura y de la Precipitación, en la Ciudad de Toluca, Estado de México. Periodo: 1970-2013. Tesis. Facultad de Planeación Urbana y Regional. UAEMEX.
- Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (WWAP) (2016). Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el mundo 2016. *Agua y Empleo*. Paris. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000244103>
- Ramírez, D. (2018). Análisis de eficiencia térmica del Ciclo Diesel. *Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte*.
- Ramos, L. (2007). Naturaleza y ciudad en épocas prehispánicas. El caso de las culturas nucleares sudamericanas. *Urbano*. Vol. 10 (16): 107-112.
- Rebane, K. (1995). Energy, entropy, environment: why is protection of environment objectively difficult? *Ecological Economics*, 13: 89-92. En Browne, David, O'Regan, Bernardette y Moles, Richard. 2012. Comparison of Energy flow accounting, energy flow metabolism ratio analysis and ecological footprint as tools for measuring urban sustainability: A Case-study of an Irish city-region. *Ecological Economics* 83: 97-107. doi:10.1016/j.ecolecon.2012.08.006
- Rebora, A. (1978). El ordenamiento territorial y urbano en México. Problemas y perspectivas. *Comercio Exterior*. Vol. 28 (10): 1181-1191.
- Rendón, L. y Godínez, J. (2016). Evolución y cambio industrial en las Zonas Metropolitanas del Valle de México y de Toluca, 1993-2008. *Análisis Económico*, Vol. 31 (77), 115-146. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41345703006>
- Rees, W. (1996). Indicadores territoriales de sustentabilidad. *Population and Environment: A journal of interdisciplinary Studies*. Vol 17 (3).
- Reporte Índigo (2021). "Esto huele a negocio": Fernando Flores por concesión del servicio de basura en Metepec. <https://www.reporteindigo.com/reportes/eso-huele-a-negocio-fernando-flores-por-concesion-del-servicio-de-basura-en-metepec/>
- Rosales, N. (2018). Balance ambiental: una herramienta metodológica para un urbanismo más sustentable. *Qivera. Revista de Estudios Territoriales*. Vol. 20 (1).
- Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; Persson, Å.; Stuart III Chapin, F.; Lambin, E.; Lenton, T. M.; Schffer, M.; Folke, C.; Schellnhuber, H. J.; Nykvist, B.; A de Wit, C.; Hughes, T.; van der Leeuw, S.; Rodhe, H.; Sörlin, S.; Synder, P. K.; Constanza, R.; Svedin, U.; Falkenmark, M.; Karlberg, L.; Corell, R.W.; Fabry, V. J.; Hansen, J.; Walker, B.; Liverman, D.; Richardson, K.; Crutzen, P. y Foley, J. (2009). Planet Boundaries: Exploring the safe operating space for Humanity. *Ecology and Society*, 14 (2). <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>
- Rodríguez, E. y Montesillo, J. (2017). Propuesta para la gestión sustentable de los residuos sólidos urbanos en la zona central conurbada de Toluca. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño* 12, 21.
- Rueda, S. (1997). Metabolismo y complejidad del sistema urbano a la luz de la ecología. *Ciudades para un futuro más sostenible*. <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2/a008.html>
- Rueda, S. (2013). El urbanismo ecológico. *Revista Digital Territorio, Urbanismo, Sostenibilidad, Paisaje, Diseño Urbano* (4). <http://urban-e.aq.upm.es/articulos/ver/el-urbanismo-ecol-gico/completo>
- Sáez, A., Urdaneta, G y Joheni, A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*. Vol. 20 (3), 121-135.
- Sánchez, M., Casado, J., Bocco, G. (2013). *La política de Ordenamiento Territorial en México. De la Teoría a la Práctica*. Instituto de Geografía. UNAM.
- Sánchez, M. P., Cruz, J., Maldonado, P. (2019). Gestión de residuos sólidos urbanos en América Latina: un análisis desde la perspectiva de la generación. *Finanz. Polític. Econ.* Vol. 11 (2): 321-336. <http://doi.org/10.14718/revfinanzpolitecon.2019.11.2.6>
- Salazar, M. (2019). *Se importa a México el 80% de lo que consumimos*. El Sol de Orizaba. Lunes 30 de noviembre. <https://www.elsoldeorizaba.com.mx/local/se-importa-a-mexico-el-80-de-lo-que-consumimos-orizaba-veracruz-cordoba-xalapa-4640471.html>
- Salinas, L., Soto, L. (2019). Política de vivienda en México: entre la expansión y el retorno al centro. *Investigaciones Geográficas*. UNAM. DOI: dx.doi.org/10.144350/rig.59751
- Sandoval, E. (1993). Industrialización y urbanización en el Estado de México. *Convergencia. Revista de Ciencias Sociales*. (4):124-137.
- Santamaría, I. (2014). *Termodinámica Moderna. Teoría de no equilibrio con enfoque multidisciplinario*. 1era Edición. Trillas. México.



- Sassen, S. (2011). *Ciudad y globalización*. Editorial Olacchi. Ecuador.
- Schandl, Heinz, Grünbühel, Clemens, Harbel, Helmut, Weisz, Helga. 2002. Handbook of physical accounting: measuring biophysical dimensions of socio-economic activities. *IFF Social Ecology Working Paper* No. 73. En Browne, David, O'Regan, Bernardette y Moles, Richard. 2012. Comparison of Energy flow accounting, energy flow metabolism ratio analysis and ecological footprint as tools for measuring urban sustainability: A Case-study of an Irish city-region. *Ecological Economics* 83: 97-107. doi:10.1016/j.ecolecon.2012.08.006
- Schneider, H., y Samaniego J. (2010). *La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile.
- Schrödinger, E. (1944). *¿Qué es la vida?* TusQuets. Editores. 2da Edición. 2017. España.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural y Alimentación. (2017) *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030*. Gobierno de México.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (2018). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México*, 2015. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825006792.pdf
- Secretaría de Desarrollo Social (1996). Informe Nacional del Comité Preparatorio de México para la Conferencia Cumbre de las Naciones Unidas sobre las Ciudades (Hábitat II) en: Gutiérrez, J. (2017). México y la Nueva Agenda Urbana. Hoja de ruta con trazos invisibles. [in]capacidades institucionales en el Estado de México. *Bitácora Urbano Territorial* (2):35-43.
- Secretaría de Economía (2020). *Panorama Minero del Estado de México*. Dirección de Operación Geológica.
- Secretaría de Energía (2019). *V. Infraestructura del Sistema Eléctrico Nacional*. PRODESEN 2019-2023.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010). *Factor de Emisión Eléctrico 2013*. Programa GEI México. <https://www.geimexico.org/factor.html>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2016). *Factor de Emisión Eléctrico 2015*. https://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/cicc/aviso_factor_de_emision_electrico_2015.pdf
- Serna M., Morales T., & Guerrero J. (2014). Análisis de flujos de agua en áreas metropolitanas desde la perspectiva del metabolismo urbano. En: *Revista Luna Azul*, (39): 234 – 249.
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (ND). *Avance de Siembras y Cosechas*. Resumen por estado. Base de datos. http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do
- Sistema de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. (2012). *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA)*. <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>
- Smith, J., Van Ness, H., Abbott, M. (2003). *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. McGraw Hill. 6ª Edición. México.
- Steffen, W.; Richardson, K.; Rockström, J.; Cornell, S.; Fetzer, I.; Bennett, E.; Biggs, R.; Carpenter, S.; De Vries, W.; De Witt, C.; Folke, C.; Gerten, D.; Heinke, J.; Mace, G.; Persson, L.; Ramanathan, V.; Reyers, B. y Sörlin, S. (2015). Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*. Vol. 347. (6223). DOI: 10.1126/science.1259855
- Suárez, L. y Mejía, A. (2019). Segmentación de vivienda a nivel municipal en la Zona Metropolitana de Toluca por movilidad al trabajo y servicios de vivienda particulares. En: *Desigualdad socio-espacial, innovación tecnológica y procesos urbanos*. UNAM y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C. ISBN UNAM Volumen III: 978-607-30-2642-0 ISBN. <http://ru.iiec.unam.mx/id/eprint/4783>
- Tello, L. y Díaz, J. P. (2021). Análisis de la contaminación ambiental usando técnicas de teledetección y análisis de componentes principales. *TecnoLogias*, Vol. 24, (50). <https://revistas.itm.edu.co/index.php/tecnologicas/article/view/1710/1806>
- Testa J., Bertoni M., y Maffioni J. (2017). Análisis de los ciclos de metabolismo urbano para una ciudad turística sustentable y competitiva, el caso de Miramar (Buenos Aires, Argentina). En: *Desafíos del Turismo para el Desarrollo Sostenible*. Mar del Plata. Universidad
- Toledo, V. (1981). Intercambio ecológico e intercambio económico. En Leff, E. (1981) *Biosociología y Articulación de las Ciencias*. UNAM.
- Toledo, V. (2013). El metabolismo social: una nueva teoría socioecológica. *Relaciones* (136), 41-71. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rz/v34n136/v34n136a4.pdf>



- Toluca Capital (2019). Foro internacional “Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca”. JUNIO 2019. <https://www2.toluca.gob.mx/wp-content/uploads/2019/09/TOL-PDF-FIA2019-EJE.pdf>
- Torres, F. (2011). El abasto de alimentos en México. Hacia una transición económica territorial. *Revista Problemas del Desarrollo*, Vol. 166 (42).
- Trejo, J., Arriaga, E. (2009). Memoria colectiva: vida lacustre y reserva simbólica en el Valle de Toluca, Estado de México. *Convergencia. Revista de Ciencias Sociales*. (50): 303-321.
- Tyrtania, L. (2008). La indeterminación entrópica. Notas sobre disipación de energía, evolución y complejidad. *Desacatos*. (28): 41-63.
- Velázquez, A. (2007). La organización, el sistema y su dinámica. Una versión desde Niklas Luhmann. *Revista EAN* (61): 129-156
- Velázquez, C. (2014). *Estudio del estado y evolución de la cubierta vegetal en áreas naturales protegidas y áreas verdes en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca del 2000 al 2008*. [Tesis licenciatura, Facultad de Planeación urbana y Regional, UAEMEX]
- Velázquez, L. (2021). Pierden municipios del Valle de México 40% del agua potable en fugas. *Heraldo del Heraldo del Estado de México*. 5 de Agosto. <https://hgrupoeditorial.com/pierden-municipios-del-valle-de-mexico-40-del-agua%E2%80%AFpotable-en-fugas/>
- Vera, A (2009). *Breve historia de las ciudades del mundo antiguo*. Ediciones Nowtilus. Madrid.
- Viesca, F., Flores, J., Romero, A., Garduño, M., Quinero, B. (2011). El impacto de la desecación de Lerma en la gastronomía lacustre de San Pedro Tultepec de Quiroga, Estado de México. *El Periplo Sustentable* (21): 101-138.
- Vilchis, I.; Garrocho, C. F. y Díaz, C. (2018). Modelo dinámico adaptativo para la toma de decisiones sostenibles en el ciclo hidrosocial urbano en México. *Revista de Geografía Norte Grande*, (71), 59-90. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022018000300059>
- Vilchis, I; Garrocho, C. (2018b). Comportamiento termoplumiométrico en la zona metropolitana de Toluca: el deterioro ambiental de las ciudades. *Sociedad y Ambiente*. (18).
- Villalba L. (2016). *Metabolismo urbano de Tandil, uso en la gestión de los residuos sólidos urbanos*. La Plata, Universidad Nacional de la Plata.
- Von Bertalanffy, L. (1968). *Teoría general de los sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones*. Fondo de Cultura Económica. Vigésimo segunda reimpresión. México.
- Von Betanlaffy, L. (1976). *Teoría General de Sistemas*. Ira Edición en español 2006. Fondo de Cultura Económica. México.
- White, R. (2003). *Building the ecological city*. Cambridge. Woodhead.
- Wolman, Abel (1965). The metabolismo of Cities. *Scientific American*, 213, 179-190. <http://irows.ucr.edu/cd/courses/10/wolman.pdf>
- World Air Quality Report (2018). *IQAir AirVisual 2018 World Air Quality Report*. <https://www.iqair.com/us/blog/press-releases/IQAir-AirVisual-2018-World-Air-Quality-Report-Reveals-Worlds-Most-Polluted-Cities>
- Yishin W. y Hwong-wen M. (2018). Analysis of uncertainty in material flow analysis. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1017-1028. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.202>
- Zhang, Y.; Zhifeng Y. y Wei, L. (2006). Analyses of urban ecosystem based on information entropy. *Ecological modelong* Vol. 197, (1-2) 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.02.032>
- Zhang, Yan. (2019). Urban Metabolism. En: *Urban Metabolism. Encyclopedia of Ecology*, 2nd Edition, Vol. 4. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10756-0>