

Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG). Revista digital del Programa de Docencia e Investigación en Sistemas de Información Geográfica (PRODISIG). Universidad Nacional de Luján, Argentina.

<http://www.revistageosig.wixsite.com/geosig> (ISSN 1852-8031)

Luján, Año 16, Número 29, 2024, Sección I: Artículos. pp. 1-25

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES PARA EL ESTUDIO DEL TRANSPORTE URBANO DE MERCANCÍAS EN LA ZONA METROPOLITANA DE TOLUCA

Lizbeth Tovar Plata– Raquel Hinojosa Reyes– Juan Campos Alanís– Edel Cadena Vargas

Universidad Autónoma del Estado de México

ltovarp@uaemex.mx

RESUMEN

El transporte urbano de mercancías representa un componente clave en la economía urbana, sin embargo, enfrenta serios desafíos, por lo que su análisis y optimización requieren herramientas innovadoras que permitan comprender sus dinámicas complejas. La presente investigación explora el potencial de combinar los sistemas de información geográfica (SIG) con la simulación basada en agentes (SBA) para el estudio del transporte de mercancías en la Zona Metropolitana de Toluca (ZMT). En el SIG se utilizaron técnicas de modelación espacial para identificar áreas homogéneas en función de la demanda de transporte y las características socio-territoriales, que sirvieron como base para simular tres escenarios con la SBA: uno con las condiciones actuales y dos escenarios alternativos con centros de consolidación de carga (CCC) ubicados en zonas estratégicas obtenidas en la modelación espacial. Los resultados revelan que los CCC reducen significativamente la distancia recorrida por los vehículos de carga, el consumo de combustible y las emisiones de contaminantes. Este estudio permite ver cómo la integración de los SIG y la SBA ofrece un enfoque integral para analizar el transporte urbano de mercancías considerando los factores espaciales y el comportamiento de los agentes involucrados.

Palabras clave: SIG, Simulación basada en agentes, Transporte urbano de mercancías, Modelación espacial, Sostenibilidad.

ABSTRACT

Urban freight transport represents a key component of the urban economy; however, it faces significant challenges, requiring innovative tools to analyze and optimize its complex dynamics. This research explores the potential of combining geographic

information systems (GIS) with agent-based simulation (ABS) to study freight transport in the Toluca Metropolitan Area (TMA). Spatial modeling techniques were applied within the GIS framework to identify homogeneous areas based on transport demand and socio-territorial characteristics, which served as the foundation for simulating three ABS scenarios: one reflecting current condition and two alternative scenarios incorporating consolidation centers (CCCs) strategically located based on the spatial modeling results. The findings reveal that CCCs significantly reduce the distance traveled by freight vehicles, fuel consumption, and pollutant emissions. This study demonstrates how the integration of GIS and ABS provides a comprehensive approach to analyzing urban freight transport, considering spatial factors and the behavior of the agents involved.

Keywords: Geographic information systems, agent-based simulation, urban freight transport, spatial modeling, sustainability.

INTRODUCCIÓN

El transporte urbano de mercancías, también conocido como distribución urbana de mercancías, representa una actividad esencial en las ciudades, facilitando la conexión entre los centros de producción y los puntos de consumo, permitiendo el abasto de distintos productos para satisfacer las necesidades diarias de la población. Este tipo de transporte no solo es fundamental para el crecimiento económico y la competitividad de las ciudades, sino que también juega un rol crucial en el bienestar social, al asegurar que los bienes estén accesibles y disponibles para los consumidores finales (Farfán, 2016; Aresti *et al.*, 2016). El aumento de la población en las zonas urbanas ha traído como consecuencia un aumento en la demanda de bienes que son distribuidos mediante el transporte urbano de mercancías, lo que trae como consecuencia un aumento en el número de vehículos de carga circulando en las ciudades, esto plantea problemáticas en la gestión de la movilidad, el consumo energético y las emisiones de gases contaminantes en las urbes.

A diferencia del transporte de personas, donde los viajeros son actores activos que toman decisiones sobre sus rutas y horarios, el transporte de mercancías implica un conjunto de elementos pasivos (productos, materias primas, insumos) que requieren manipulación, carga y descarga por personal especializado, además de lugares y vehículos con características específicas para llevar a cabo esas labores, lo que lo lleva a enfrentar importantes desafíos, ya que, como lo menciona Gershenson (2015), las ciudades no solo son un entorno físico, sino un espacio en el que convergen elementos sociales, económicos, políticos y físicos, creando estructuras urbanas que condicionan y son condicionadas por los flujos de personas y bienes, con factores que inciden directamente como calles angostas, falta de infraestructura para carga y/o descarga de mercancías, la densidad de población y empleo, la dinámica de movilidad de la población que vive, visita o trabaja en las ciudades y la competencia por el espacio con otros vehículos motorizados, entre muchos otros aspectos que afectan tanto la planificación como la eficiencia del transporte de carga urbano y que generan impactos negativos en la movilidad y el medio ambiente (Iwan *et al.*, 2016).

Uno de los problemas es que el transporte urbano de mercancías ha sido principalmente abordado como un problema logístico, generalmente ha sido gestionado y planificado por operadores logísticos cuyo interés es optimizar rutas y tiempos para minimizar costos,

donde muchas veces se pierde de vista la variabilidad y las restricciones propias del entorno urbano (Cabrera, 2011). Dada la complejidad que tiene el transporte de mercancías en el contexto urbano, que es en sí mismo complejo, el uso de herramientas como los sistemas de información geográfica (SIG) y la simulación basada en agentes (SBA) y pueden ser una alternativa para estudiar este transporte.

En las últimas décadas ha crecido el interés por considerar variables espaciales en el modelado del transporte urbano de mercancías y es aquí donde el uso de los SIG cobra especial importancia al ayudar a comprender cómo la estructura urbana influye en la eficiencia del sistema en su conjunto (Ducret *et al.*, 2016). En este sentido, los SIG aportan un valor significativo al análisis del transporte de mercancías, ya que facilitan la identificación de zonas con alta demanda de bienes y permiten analizar y evaluar el transporte de mercancías desde distintos ángulos, por ejemplo: evaluar cómo las características espaciales del entorno urbano, como la densidad de infraestructura vial o la proximidad a zonas residenciales, pueden afectar la logística y la operación de los vehículos de carga (Sánchez-Díaz *et al.*, 2014; Kawamura y Miodonski, 2011), también la interacción espacial en el movimiento de mercancías con el objetivo de proporcionar medidas de política para el movimiento de carga (Venkadavarahan y Marisamynathan, 2021), la relación la estructura espacial de la ciudad con la ubicación de las entidades receptoras de carga (De Bakshi *et al.*, 2020) y también permiten relacionar la estructura urbana con las emisiones generadas por la distribución de carga (Wygonik y Goodchild, 2018).

El enfoque espacial en la modelación del transporte urbano de mercancías es un enfoque innovador que, por el momento se ha explorado a detalle, ha sido utilizado en investigaciones durante la última década arrojando resultados que complementan los enfoques técnicos y económicos, además de ampliar el conocimiento de este transporte.

Por su parte, la SBA actualmente se ha posicionado como un método efectivo para modelar sistemas complejos, se considera uno de los más recientes métodos de simulación, hoy en día se ha vuelto muy popular en la investigación de distintos sectores y disciplinas debido a su flexibilidad y eficacia para simular sistemas complejos (Vélez, 2019), este método permite tratar de manera sencilla la complejidad de muchos fenómenos sociales y económicos (García-Valdecasas, 2011). En el ámbito urbano, la SBA ha demostrado ser especialmente útil, ya que permite modelar la interacción de múltiples agentes, facilitando la experimentación con distintas políticas y estrategias sin necesidad de intervenir directamente en el entorno real.

En el transporte de mercancías la SBA permite representar a los diferentes actores que interactúan en él, como empresas distribuidoras, transportistas, comercios y gobierno, como agentes autónomos con comportamientos y objetivos específicos, este método ha permitido simular escenarios donde los agentes interactúan entre sí y con el entorno, brindando una comprensión más detallada de cómo se desarrolla el transporte de mercancías en la ciudad y facilitando el análisis de posibles soluciones logísticas (García-Valdecasas, 2011), así como la simulación de los patrones de transporte de carga (Bok y Tavasszy, 2018), el análisis de los diferentes comportamientos y acciones del transporte urbano de mercancías (Gómez-Marín *et al.*, 2018); simulaciones de soluciones logísticas del transporte urbano de mercancías derivadas del comercio electrónico (Alves *et al.*, 2019), sensibilidad conductual de los agentes en diferentes escenarios (Bean y Joubert, 2019).

En la revisión de la literatura se identificó un estudio de transporte urbano de mercancías realizado en Indonesia donde se utilizaron los SIG y la SBA, el primero permitió incluir el aspecto espacial de los comercios minoristas y de la infraestructura vial; mientras que el segundo permitió capturar el dinamismo del problema de generación de rutas dinámicas para vehículos de transporte urbano de mercancías, los agentes simulados fueron los comercios minoristas y los vehículos de carga. Los resultados obtenidos indicaron una relación lineal entre el grado de dinamismo logístico (la relación entre el número de solicitudes y el número total de minoristas) y la distancia recorrida (Sopha *et al.*, 2016).

La combinación los SIG y la SBA que se propone en este trabajo de investigación busca mostrar cómo pueden combinarse para mejorar los estudios de planificación y optimización del transporte urbano de mercancías y pretende aportar una forma de abordar el estudio de este tipo de transporte; por un lado, la modelación espacial, puede otorgar un valor agregado al integrar variables espaciales en su estudio y permitir tener un diagnóstico previo del territorio, y, por otro lado, la simulación basada en agentes, puede ayudar a analizarlo tomando en cuenta a los agentes involucrados y la forma en que estos pueden actuar; lo anterior con la finalidad de realizar estudios que sirvan de apoyo a la toma de decisiones en vías de promover una logística más eficiente y sostenible en las ciudades.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Se utilizaron las siguientes variables identificadas en la revisión de literatura: uso de suelo, red vial, población, proximidad, empleo, viviendas, edad de la población y comercios, el nivel de desagregación territorial con el que se trabajó fue el de AGEB (Área Geoestadística Básica). Ver Tabla 1.

Tabla 1. Variables utilizadas en la modelación espacial del transporte urbano de mercancías.

Variable	Indicador	Fuente de obtención
Uso de suelo	Densidad comercial Densidad industrial Densidad habitacional Densidad de servicios	Elaboración propia con base en el DENU, 2018. INEGI.
Red vial	Densidad de vialidades regionales Densidad de vialidades primarias Densidad de vialidades secundarias Densidad de vialidades locales	Marco Geoestadístico 2019, INEGI
Población	Densidad de la población	Censo de Población y Vivienda, 2020, INEGI.
Proximidad	Distancia a la red vial regional o primaria	Dato calculado en QGIS del AGEB (centroide) a la red vial primaria o regional.

Empleo	Densidad de empleo	Elaboración propia con base en el DENUE, 2018, INEGI.
Ingreso	Nivel de ingreso	Elaboración propia con base en datos de bienes en vivienda, Censo 2020, INEGI.
Viviendas	Tipo de vivienda	Elaboración propia con base en datos de vivienda, Censo 2020, INEGI.
Edad de la población	Población de 15 a 64 años	Censo de Población y Vivienda, 2020, INEGI.
Establecimientos comerciales	Comercios minoristas	DENUE 2018, INEGI.

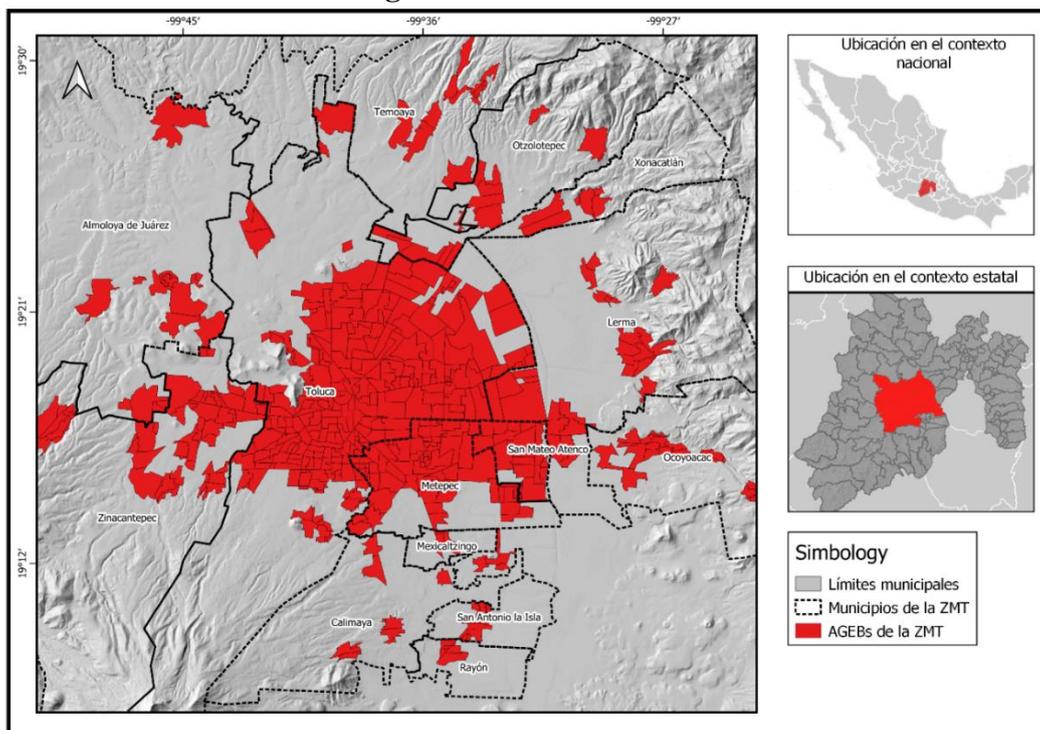
Fuente: Elaboración propia con base en la revisión de literatura.

Se utilizó el software estadístico IBM SPSS Statistics 25 y con el sistema de información geográfica de código libre QGIS 3.28, en el cual se integró la información obtenida al archivo vectorial de AGEB, con lo que fue posible espacializar y representar cartográficamente las zonas obtenidas en función de su demanda de mercancías y características socio-territoriales.

Área de estudio

La Zona Metropolitana de Toluca (ZMT) es considerada la quinta zona metropolitana con mayor número de habitantes en México, con una población total municipal de más de 2 millones de habitantes (INEGI, 2020); actualmente ocupa el segundo lugar a nivel estatal, está conformada por 16 municipios (SEDATU-CONAPO-INEGI, 2024). La superficie urbana de la ZMT es de aproximadamente 403.8 km². Ver Figura 1.

Figura 1. Zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

En el aspecto económico, la ZMT actualmente es considerada como una de las zonas metropolitanas más dinámicas del país, según datos del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas, existen poco más de 95 mil unidades económicas en las que destacan que el 45% de estas corresponde al comercio al por menor, estos comercios se consideran los principales clientes del transporte urbano de mercancías, lo que permite inferir la alta demanda de viajes de transporte de carga en la zona de estudio (DENU, 2019).

Metodología

Para esta investigación, la metodología se dividió en dos fases principales: la primera fase se centra en la aplicación de un SIG para realizar un análisis espacial que permita identificar zonas homogéneas en función de la demanda de transporte y sus características socio-territoriales. En la segunda fase se recurrió a la SBA donde se simuló tres escenarios: uno basado en las condiciones actuales y dos adicionales con centros de consolidación de carga (CCC) en ubicaciones estratégicas obtenidas en la modelación espacial para comparar los efectos sobre la eficiencia logística y el impacto ambiental.

Fase 1: Análisis Espacial en SIG

La finalidad de esta fase fue tener un diagnóstico de la demanda de transporte urbano de mercancías y su relación con las características socio-territoriales, para determinar si la demanda de mercancías es o no homogénea en el área de estudio, para lo anterior los datos de cada variable se integraron al archivo vectorial de las AGEBS, y se estandarizaron para tener todos los datos en las mismas unidades, para ello se utilizó el método de estandarización conocido como valor Z, (Buzai, *et al.*, 2012) con la siguiente fórmula:

$$Z = (x - \mu) / \sigma$$

Donde x es el valor observado, μ la media de los datos y σ la desviación estándar del conjunto de datos.

Con las variables estandarizadas se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para transformar en un nuevo conjunto donde las variables no estuvieran correlacionadas, y así evitar repetición o redundancia en la información reduciéndolos a sus componentes principales.

Una vez obtenidos los componentes principales se procedió al análisis de clúster, el cual es una técnica de agrupamiento está basada en la similitud de las observaciones, cuya utilidad es poder obtener grupos homogéneos; primeramente, se utilizó el clúster jerárquico con el método de Ward, el cual une los casos buscando minimizar la varianza dentro de cada grupo, este procedimiento crea grupos homogéneos y con tamaños similares para determinar el número de clúster óptimos a aplicar posteriormente con el método de K-medias el cual permitió asignar cada observación (AGEB) al clúster que se encuentra más próximo en términos de la media (Balzarini, *et al.*, 2015); con ello se realizó la agrupación de AGEBS con características territoriales y número de comercios minoristas similares.

Esta etapa se realizó con el software estadístico IBM SPSS Statistics 25 y con el sistema de información geográfica de código libre QGIS 3.28, en el cual se integró la información obtenida al archivo cartográfico de AGEBS, con lo que fue posible espacializar y

representar cartográficamente las zonas obtenidas en función de su demanda de mercancías y características socio-territoriales.

Fase 2: Simulación basada en agentes

Esta segunda fase tomó como referente los resultados obtenidos en la primera etapa de la investigación. Se simularon los escenarios tomando como referencia únicamente los AGEB de alta demanda.

Como lo refiere Caselles (2008) no existen instrucciones universales para crear simulaciones basadas en agentes, pero existen ciertos pasos comunes, los cuales son: 1) Definición del problema; 2) Modelo conceptual; 3) Modelo computacional; y 4) Obtención de reportes.

Definición del problema

Empresas distribuidoras de distintas marcas, instaladas en diferentes sitios de la zona de estudio, realizan la entrega de productos industrializados en los comercios minoristas, mediante vehículos de carga que son de distinta capacidad y utilizan un mismo tipo de combustible, los cuales circulan por la ciudad para realizar la entrega de mercancías en una ventana de tiempo de 8 horas. Los vehículos salen del centro de distribución de cada empresa y se dividen en toda la ciudad para atender a todos los comercios minoristas existentes en las zonas de alta demanda.

Modelo conceptual

Este modelo se compone de la definición de objetivos y comportamiento de agentes y la determinación del entorno.

Definición de los objetivos y comportamiento o atributos de los agentes. Para cada agente se consideraron los objetivos y algunas propiedades (atributos). La Figura 2 muestra un resumen de los distintos agentes considerados para la simulación, sus objetivos, conductas o atributos.

Figura 2. Agentes elegidos para la simulación, objetivos, atributos o comportamiento por agente.

	Objetivos	Atributos o comportamiento
1. Vehículos de carga/transportistas	Realizar las entregas diarias	Tipo de vehículo, distancia recorrida, consumo de combustible, emisiones generadas
2. Comercios minoristas	Tener su mercancía a tiempo	Ubicación y frecuencia de recepción de mercancías
3. Empresas distribuidoras	Distribuir sus mercancías en la ciudad	Ubicación, número de vehículos de carga
4. Red vial	Ofrecer espacio necesario para las actividades del transporte	Uso del transporte público

Fuente: Elaboración propia

Determinar el entorno. Para tener la posibilidad de comparar distintos escenarios y determinar el impacto que genera la distribución de mercancías y las posibles propuestas

para optimizar y planificar el TUM se diseñaron 3 escenarios: 1) Condiciones actuales; 2) y 3) Con un centro de consolidación de carga (CCC) en sitios identificados con condiciones idóneas en la fase uno.

Modelo computacional

El modelo fue implementado en el software Anylogic, en su versión gratuita Personal Learning Edition, el cual está basado en JavaScript y permite experimentar con diferentes escenarios hipotéticos al realizar simulaciones de sistemas dinámicos, de eventos discretos y basados en agentes (Borshchev y Grigoryev, 2018). Para recrear las ubicaciones reales de cada elemento se retomó del sistema de información geográfica (SIG) que tiene integrado el software y que es compatible con el formato shapefile, aquí se integró la capa de zonas obtenidas en la Fase 1. Los datos de entrada del modelo computacional se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos de entrada del modelo computacional.

Agente	Parámetros	Valor
Empresas distribuidoras	Tipo de mercancía	Variable
	Ubicación	Variable
	Cantidad de vehículos	Variable
	Tipo de vehículo	Ligero o mediano
Vehículos de carga	Distancia recorrida	Kilómetros
	Consumo de combustible	Litros por kilómetro y kg por litro
	Emissiones generadas	Gramos de contaminante por kg de combustible
Comercios minoristas	Número de comercios minoristas	Variable
	Frecuencia de recepción de mercancías	Diario
Red vial	Utilizada por el transporte público	Congestionada/no congestionada

Fuente: Elaboración de los autores.

Se analizaron doce empresas distribuidoras, las cuales se ubicaron en el entorno de simulación mediante sus coordenadas, dependiendo del tipo de mercancía que caracteriza la empresa, se determinó el tipo de vehículo de carga. Los kilómetros recorridos por los vehículos de carga se calcularon considerando los segmentos de la red vial que recorrieron para llegar desde su ubicación hasta cada una de las zonas donde se entregan las mercancías. El consumo de combustible dependió de los kilómetros recorridos y también en función al tipo de vialidades por las cuales circuló el vehículo, para una vía congestionada el consumo de combustible fue mayor que para una vía sin congestión, los parámetros utilizados se pueden ver en la Tabla 3.

Tabla 3. Consumo de combustible por tipo de vehículo y vialidad de recorrido.

Tipo de vehículo	Consumo de combustible	
	(Litros por km recorrido)	
	Con congestión	Sin congestión
Ligero (<3 Ton)	0.29	0.21
Mediano (>3 y >6 Ton)	0.31	0.22

Fuente: Consumo de combustible propuesto por Ezquerro (2020).

El consumo de litro por kilómetro se calculó tomando como referencia el consumo promedio de vehículos de carga propuesto y considerando si la vialidad que recorre presenta congestión vial o no. Como no se diferenció en el tipo de combustible utilizado, pero se trata de camiones de carga, para transformar los litros de combustible en kilogramos se utilizó el valor de .850 gr como lo sugiere Ezquerro (2020).

Para calcular las emisiones contaminantes se consideró el consumo de combustible en kilogramos y se multiplicó por los factores de emisión sugeridos por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2014) y por la Agencia Ambiental Europea (EEA, por sus siglas en inglés, 2019), para los diferentes contaminantes atmosféricos, los cuales se muestran en la Tabla 4.

Tabla1. Emisiones contaminantes por kilogramo de combustible

Emisiones (gramos de contaminante por kilogramo de combustible)					
Vehículos de carga	NO _x	VOC	CH ₄	PM	CO ₂
	34.84	3.06	0.38	1.34	3140

NO_x = óxidos de nitrógeno *VOC*=Compuestos orgánicos volátiles *CH₄*=Metano *PM*=material particulado
CO₂=dióxido de carbono

Fuente: Factores de emisión sugeridos por la SEMARNAT (2014) y la EAA (2019).

Obtención de reportes

En el modelo computacional se utilizó la opción de generar reportes de resultados, los cuales son obtenidos en formato CSV (texto delimitado por comas) para cada una de las iteraciones de las simulaciones, estos reportes fueron procesados en una hoja de cálculo con la finalidad de realizar las estimaciones necesarias.

RESULTADOS

En la Fase 1 se pudo obtener un diagnóstico de la ZMT en función de su demanda de mercancías y las características socio territoriales existentes en cada AGEB que la constituye, los clústeres obtenidos sirvieron para identificar las zonas de alta demanda, que posteriormente, fueron utilizados en la simulación. En la Fase 2, los reportes de salida después de cada simulación se utilizaron para poder comparar los resultados en los escenarios analizados, específicamente en los kilómetros recorridos por los vehículos de

carga, el consumo de combustible y las emisiones contaminantes generadas, con lo cual fue posible identificar la viabilidad del escenario alternativo propuesto.

Fase 1. Análisis espacial

Análisis de Componentes Principales

Los 14 indicadores seleccionados se redujeron a 4 componentes los cuales se pueden denominar de la siguiente manera: 1) Actividad económica; 2) Socioeconómico; 3) Habitacional y 4) Vías de comunicación, estos representan cuatro ejes para el estudio de las características socio territoriales de la ciudad y su relación con demanda de transporte urbano de mercancías. La Tabla 5 resume los cuatro componentes obtenidos y sus respectivos indicadores.

Tabla 5. Componentes principales

Componente 1	Componente 2	Componente 3	Componente 4
Densidad de servicios	Tipo de vivienda	Densidad de población	Distancia a la red vial
Densidad comercial	Población de 15-64	Densidad habitacional	Densidad vías regionales
Densidad de empleo	Ingreso	Densidad de vías locales	Densidad vías primarias
Densidad industrial			Densidad vías secundarias

Fuente: Elaboración propia.

Análisis Clúster

-Clúster jerárquico. El dendograma, muestra las agrupaciones realizadas en distintas distancias re-escaladas: 5, 10 y 15. En el caso de la distancia re-escalada 10 se forman cinco grupos, con una distancia vertical mayor lo que indica que la homogeneidad entre sus grupos es menor en comparación a la anterior por lo que se optó por trabajar con cinco clúster. Ver Figura 3.

Figura 3. Dendograma obtenido del clúster jerárquico



Fuente: Elaboración propia.

-Clúster por el método de K-medias. El método K-medias para agrupar los casos (AGEB) en función de la similitud entre los cuatro componentes obtenidos se aplicó considerando

cinco clústeres, obtenidos por el método jerárquico. El clúster que más casos tiene es el clúster número cinco, que representa el 44% de AGEBS seguido del número dos, el clúster tres agrupó sólo cuatro AGEBS, el número de casos en cada clúster se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Número de casos en cada clúster

Clúster	1	78
	2	166
	3	4
	4	53
	5	198

Fuente: Elaboración propia.

Para los comercios minoristas se obtuvieron tres clústeres, la Tabla 7 muestra las AGEBS conforme al clúster al que pertenecen, el clúster número uno concentra el 59% de los elementos, el clúster dos el 37%, mientras que el número tres concentra únicamente el 4%, sin embargo, al ser el que tiene una mayor concentración de comercios, es el que indica una mayor prioridad.

Tabla 7. Número de casos (AGEB) en cada clúster.

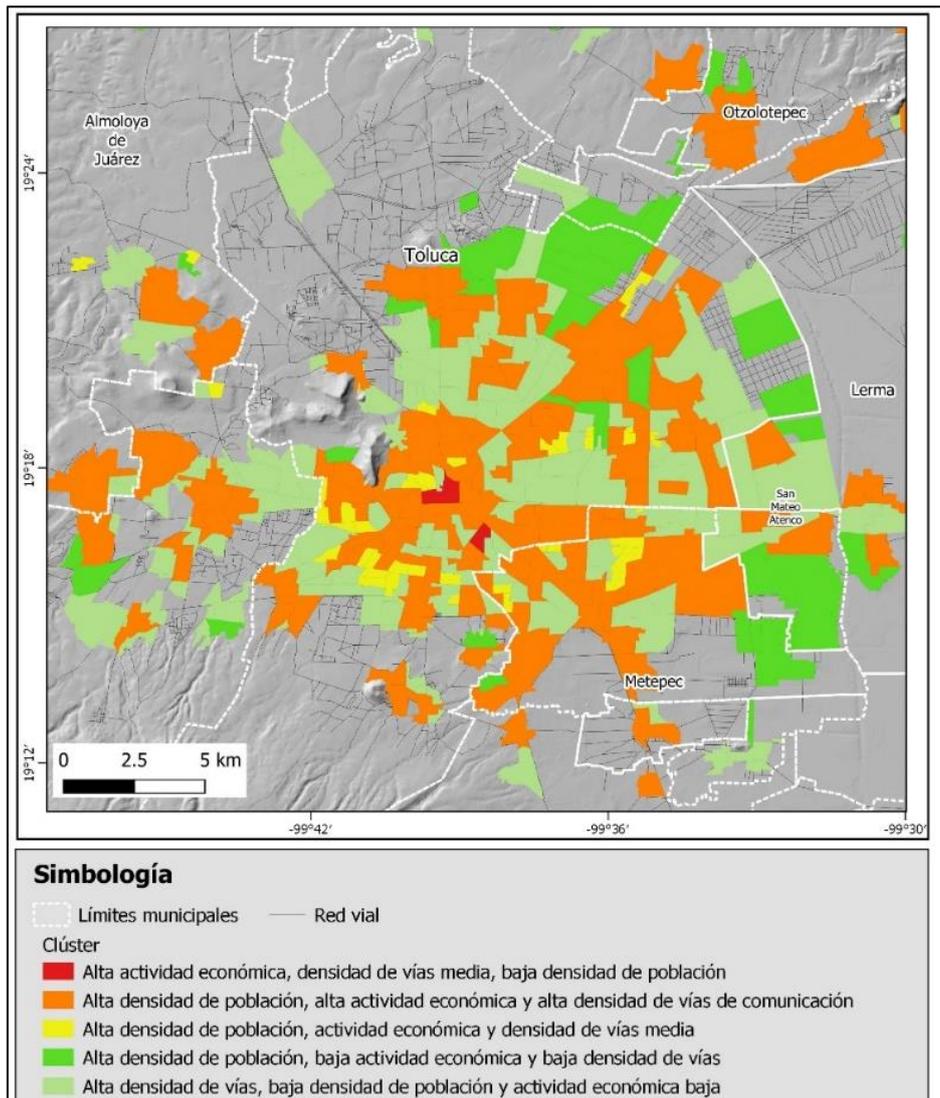
Clúster	1	292
	2	185
	3	22

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos

Representación espacial de los resultados obtenidos

La Figura 4 muestra la agrupación de AGEBS en función de sus características socio territoriales. Como sucede en la mayoría de las ciudades, el centro histórico es uno de los polígonos que más actividad económica registra, con densidad de vialidades media y baja densidad de población; las periferias de la mancha urbana se distinguen por tener una mayor densidad de vías y menor actividad económica, mientras que las altas densidades de población se distinguen alrededor de la zona centro.

Figura 4. Características socio territoriales por AGEB.

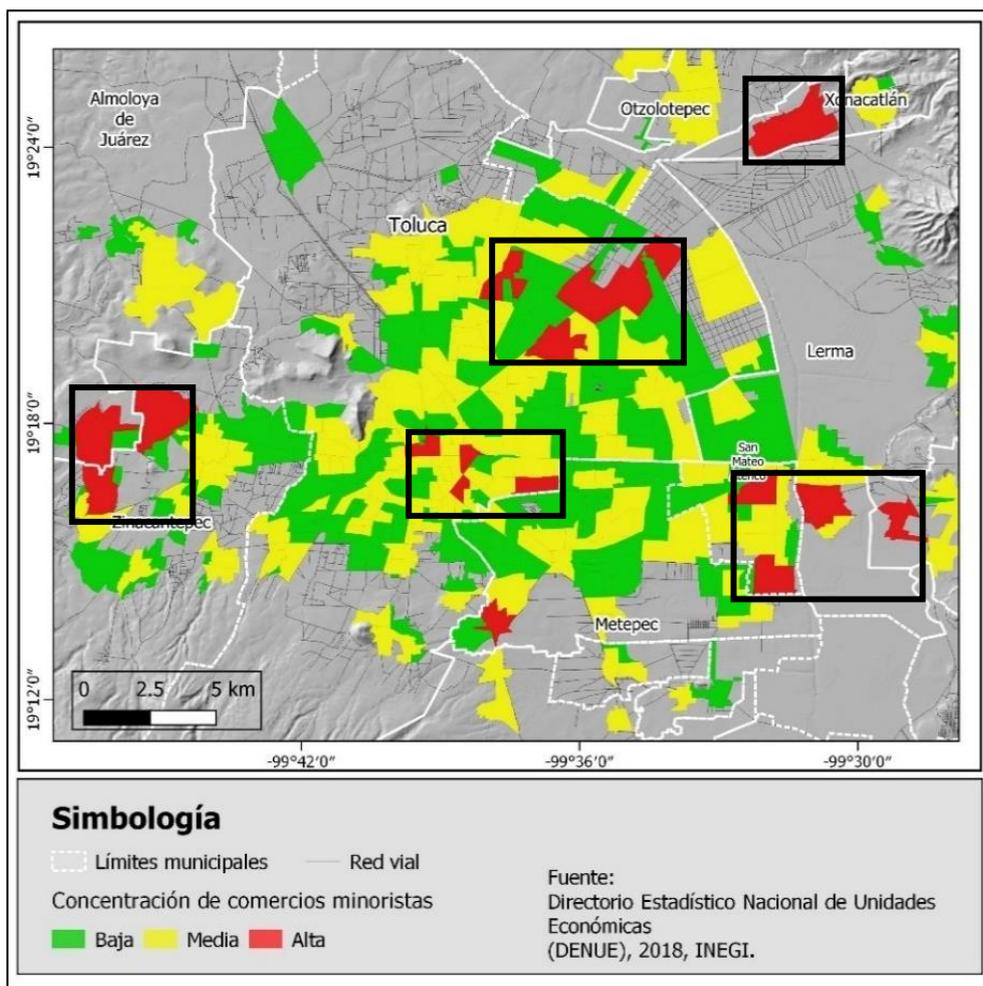


Fuente: Elaboración propia.

En el caso del clúster uno se observa que son AGEBs habitacionales con baja actividad económica y poca conectividad; en el caso del clúster dos son AGEBs con alta densidad de población, con alta actividad económica y alta conectividad; el clúster tres se caracteriza por agrupar AGEBs con la mayor actividad económica; el clúster cuatro son AGEBs habitacionales con actividad económica y conectividad media; y finalmente el clúster cinco se caracteriza por tener la mayor conectividad, pero con baja presencia de actividad económica y poblacional. Lo anterior permite afirmar que al interior de la ZMT las condiciones socio territoriales son diferentes dada la distribución espacial de la población y de las actividades económicas principalmente, lo que se traduce en mayor o menor infraestructura.

La Figura 5, muestra la agrupación de AGEBs en función de la concentración de comercios minoristas, los cuales funcionan como atractores de transporte de mercancías.

Figura 5. Concentración de comercios minoristas en la ZMT.

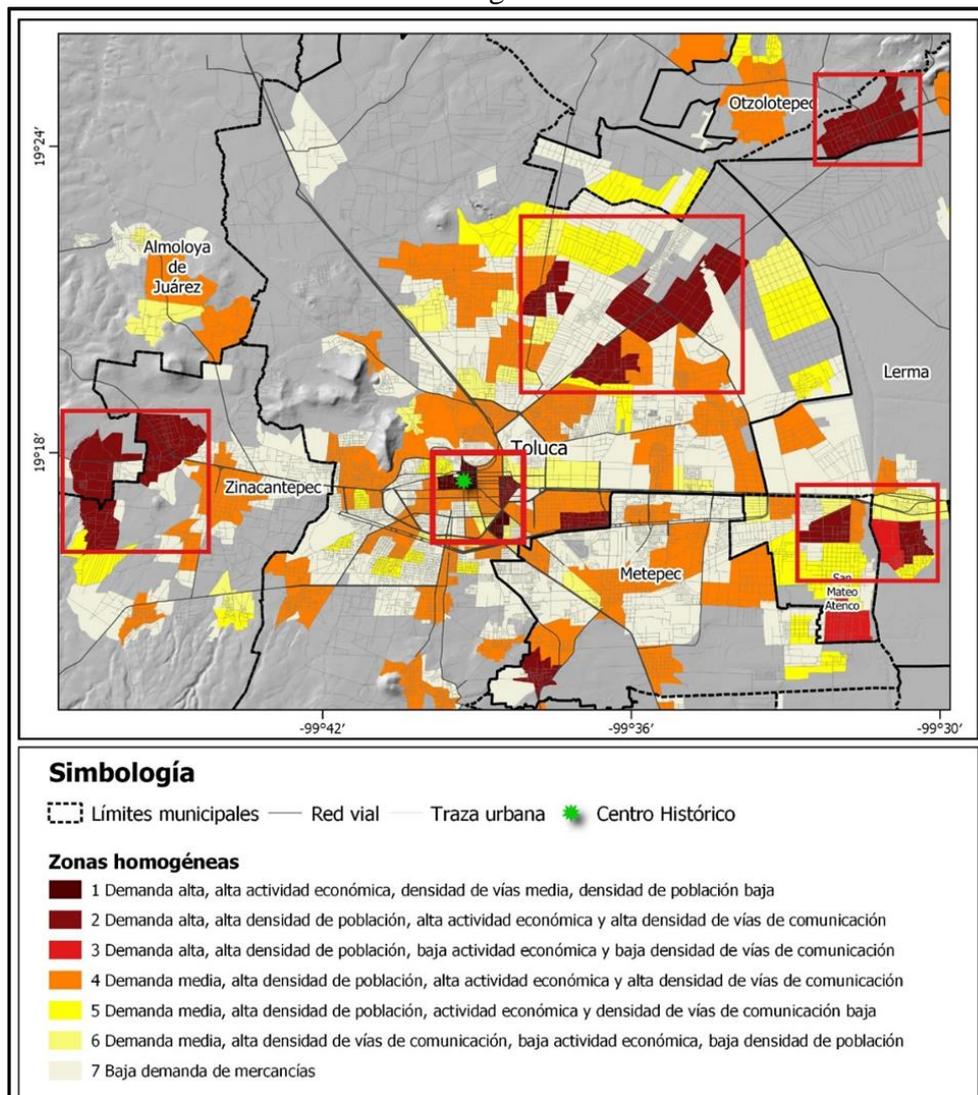


Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, las zonas con mayor concentración de comercios minoristas se encuentran dispersas en ocho de los 15 municipios que conforman la ZMT; siendo el municipio de Toluca el que mayor número de polígonos tiene con estas características, destaca nuevamente el centro histórico de la ciudad de Toluca y la porción nororiente del municipio, además de las cabeceras municipales de la mayoría de los municipios periféricos.

A partir de la información anterior, se realizó una sobreposición de los clústeres obtenidos para poder determinar zonas homogéneas en función de la demanda de mercancías y a las características socio territoriales que predominan en cada AGEB, con ello se obtuvieron siete zonas finales las cuales se muestran en la Figura 6.

Figura 6. Zonas de demanda de mercancías y características socio-territoriales homogéneas.



Fuente: Elaboración propia.

Zonas uno, dos y tres: alta demanda de transporte de mercancías

Se identificaron 22 AGEBS con alta concentración de comercios minoristas lo que se traduce en polos de alta demanda de transporte de mercancías, los cuales, a su vez se clasificaron en tres zonas donde es posible destacar distintas características socio-territoriales.

La zona uno corresponde al centro histórico de la ciudad de Toluca y al polígono donde se ubica la terminal de autobuses más importante del área metropolitana; esta zona resulta prioritaria en la regulación del transporte de mercancías dada la dinámica económica que la caracteriza, en el primer caso por ser el centro de servicios y comercio de la ZMT, y en el segundo caso por la alta actividad comercial que registra, sumando a estas características, la densidad de vías no es alta por lo que puede ser un indicador importante de problemas de congestión vehicular.

La zona dos se cataloga como de uso de suelo mixto, tanto habitacional como de actividad económica, con buena conectividad en vías de comunicación, pero donde el transporte de

mercancías ocasiona impactos negativos debido a la alta demanda, las AGEBS pertenecientes a esta zona se observan principalmente en la zona norte de Toluca donde se ubica la central de abasto y en zonas aledañas al aeropuerto, así como en los municipios de la periferia.

La zona tres se encuentra dispersa en la periferia de la ciudad de Toluca, con una densidad de población alta, sin embargo, con un déficit de vías de comunicación lo que puede representar un problema serio para las entregas del transporte de mercancías y la saturación de las vías de comunicación por parte del transporte de carga.

Estas tres zonas pueden catalogarse como áreas prioritarias para la aplicación de regulaciones específicas el transporte urbano de mercancías, donde se puedan considerar las características de cada zona para generar estrategias específicas por parte de las autoridades locales.

Zonas cuatro, cinco y seis: demanda de transporte de mercancías media

Estas zonas concentran el 37% de AGEBS (185), tienen una demanda de transporte de mercancías importante, aunque en menor medida que las primeras tres zonas, estas también están diferenciadas por sus características territoriales.

La zona cuatro es la que más predomina en la ZMT, caracterizada por usos de suelo mixtos y una densidad de vías alta, se encuentra en gran parte de la zona centro, norte y noreste de Toluca, y en todas las cabeceras municipales; al igual que la zona dos puede tener impactos negativos aunque en menor escala dada la dinámica que se aprecia en estos lugares, sin embargo, se vuelven zonas prioritarias para la regulación del transporte de mercancías con la finalidad de prevenir el aumento de los impactos negativos.

La zona cinco no tiene una presencia importante de actividades económicas, sin embargo, el principal problema es la poca densidad en vías de comunicación y la alta densidad poblacional, lo que puede implicar una problemática para el abasto de mercancías, esta zona se observa principalmente en las periferias de la ZMT.

La zona seis es una zona que no presenta mayor problemática, son AGEB con alta densidad de vías, sin embargo, no tienen una actividad económica alta, ni elevada densidad de población por lo que, hasta el momento, no implica un problema en materia de transporte de mercancías como tal, esta zona puede convertirse en lugares óptimos para dar cabida a infraestructura especial para este transporte.

Zona siete: baja demanda de transporte de mercancías

El resto de AGEBS (292) se concentran en esta zona, hasta cierto punto, actualmente no es una zona prioritaria dada la poca demanda de transporte de mercancías, sin embargo, es conveniente tener un seguimiento del crecimiento de actividades económicas en el sector minorista porque ello conllevaría a un aumento de transporte de mercancías, donde será necesario intervenir para regularlo en vías a prevenir los impactos negativos que este pudiera generar.

La Tabla 8 muestra el número de AGEB por zona y tipo de demanda.

Tabla 8. Zonas por su demanda de mercancías y características socio territoriales.

Demanda	Zona	No. de AGEB
Alta	1	4
	2	15
	3	3
Media	4	114
	5	37
	6	34
Baja	7	292

Fuente: Elaboración propia.

Aunque el estudio se ha realizado en una zona metropolitana de un país en desarrollo, se puede coincidir con los hallazgos del estudio de Ducret *et al.*, (2016), en ciudades francesas, donde afirma que al interior de las ciudades existen zonas bien diferenciadas en cuanto a sus elementos socioeconómicos e infraestructura y que estos tienen un impacto directo en la demanda de mercancías.

Los resultados de la modelación espacial permitieron corroborar, como lo mencionan Ducret *et al.*, (2016), que la demanda de mercancías en una ciudad o zona metropolitana no es homogénea, sino que está bien diferenciada por características socio territoriales, se coincide con el estudio de estos investigadores que, dependiendo del tipo de vivienda, el ingreso y densidad poblacional, la demanda de mercancías será mayor; sin embargo, en esta investigación se discrepa respecto al impacto del uso de suelo y la densidad de vías mencionado por Allen *et al.*, (2012).

En esta primera fase del estudio se hizo evidente la necesidad planteada por Anand *et al.*, (2012) y Sánchez-Díaz (2014) de realizar diagnósticos de la demanda de mercancías y un análisis de las características socio territoriales de la ciudad en estudio, además de validar el potencial que tienen los sistemas de información geográfica para permitir un mejor análisis del transporte como lo refiere Novak *et al.*, (2008).

Fase 2. Simulación basada en agentes

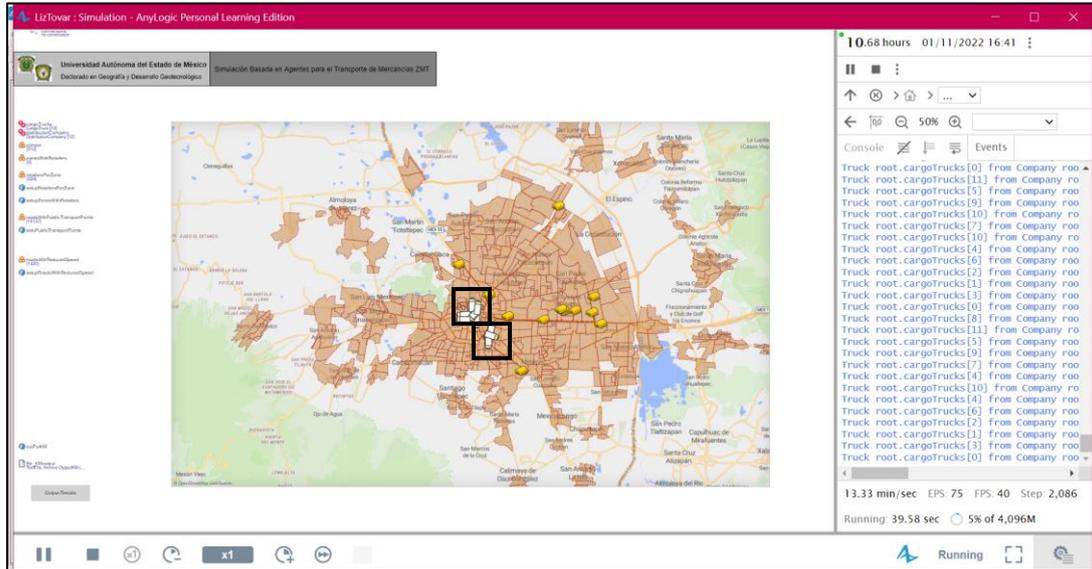
Las zonas que se simularon en esta etapa fueron la uno, dos y tres que se obtuvieron en la fase 1, las cuales corresponden a zonas de alta demanda de transporte de mercancías, cada una con distintas características socio territoriales. Fueron un total de 22 AGEBs las que conformaron estas tres zonas con alta concentración de comercios minoristas.

Escenario 1. Condiciones actuales

En este escenario los orígenes de la mercancía son las distintas empresas distribuidoras, no hay infraestructura específica para carga y descarga, no hay frecuencia y días establecidos para entrega.

Zona 1 alta actividad económica, densidad de vías media y baja densidad de población
 Son cuatro polígonos de la ciudad los cuales pertenecen a los principales centros de comercio y servicios de la ciudad capital y cuya actividad económica es alta. El número total de comercios a abastecer en esta zona es de 122, por lo que se consideró un vehículo de carga por cada empresa distribuidora, ver Figura 7.

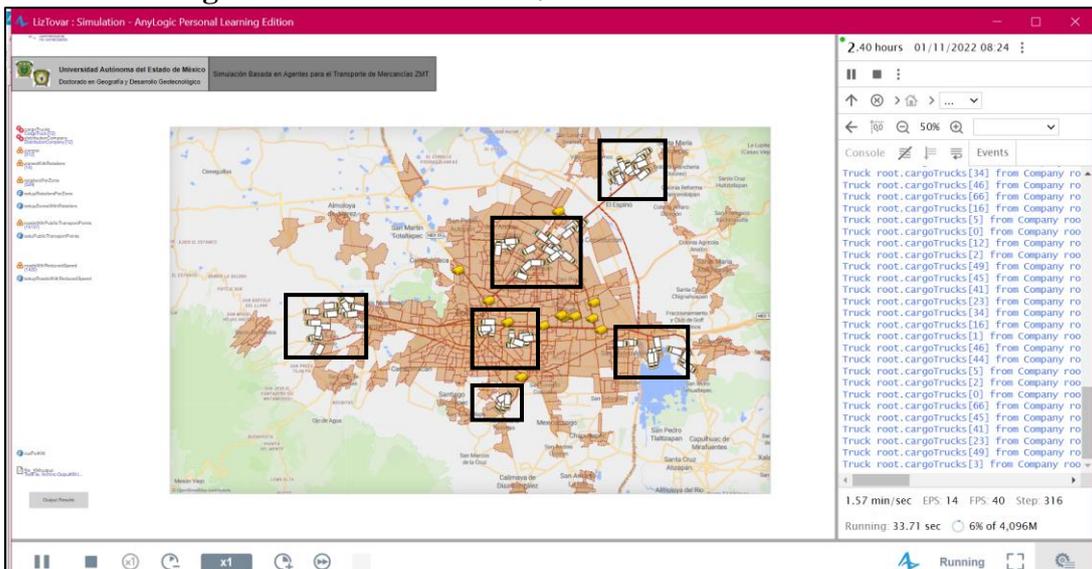
Figura 7. Simulación de la zona 1 en condiciones actuales



Fuente: Elaboración propia.

Zona 2 alta actividad económica, alta densidad de vías y alta densidad de población
 Las AGEBS correspondientes a esta zona son quince polígonos, el número total de comercios a abastecer en esta zona son 1224, dada la cantidad de comercios a abastecer, se consideraron seis vehículos de carga por cada empresa distribuidora. Ver Figura 8.

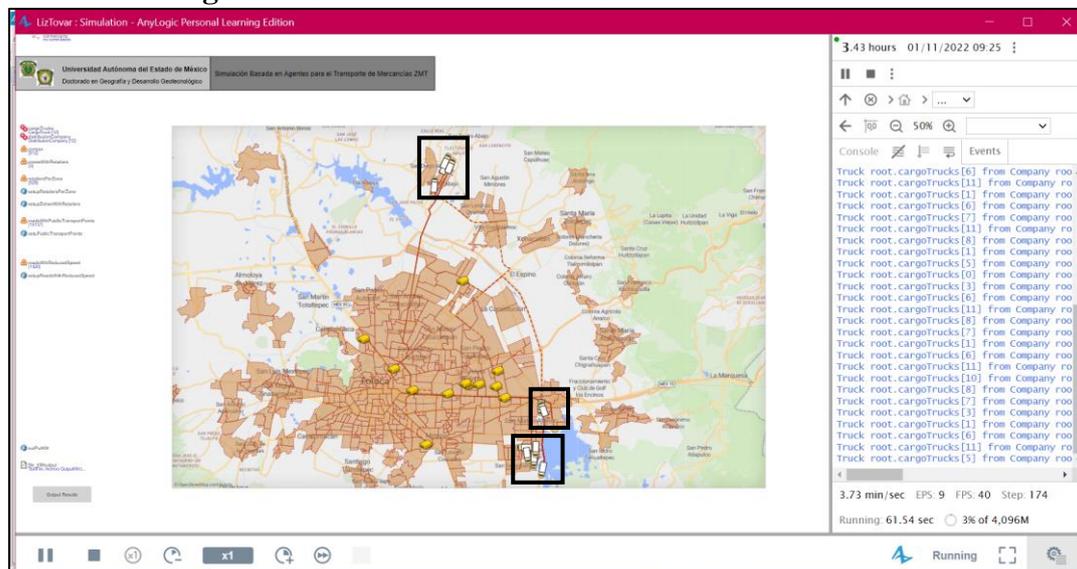
Figura 8. Simulación de la zona 2 en condiciones actuales



Fuente: Elaboración propia.

Zona 3 alta densidad de población, baja actividad económica y baja densidad de vías
 Los AGEBS correspondientes a esta zona 3 son tres polígonos, el número total de comercios por abastecer es de 200 para lo cual se consideró un vehículo de carga por cada empresa distribuidora. Ver Figura 9.

Figura 9. Simulación de la zona 3 en condiciones actuales



Fuente: Elaboración propia.

Resultados del escenario 1

El escenario 1, que recrea la situación actual, muestra un importante consumo de kilómetros recorridos, donde la zona 2 es la que más impacto genera, seguida de la zona 3 y por último la zona 1, lo cual puede corroborarse en la Tabla 9, por consiguiente, considerando los resultados, la zona 2 refleja una necesidad importante de planificación.

Tabla 9. Resumen de kilómetros recorridos, consumo de combustible y emisiones contaminantes del escenario actual.

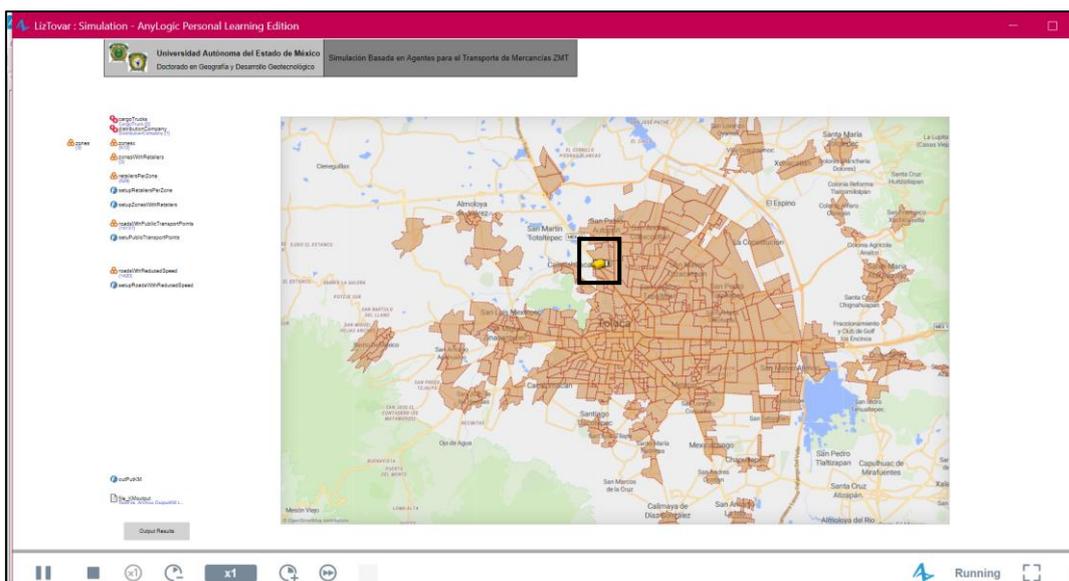
Zona	Kilómetros recorridos	Consumo Kg/lt	Kg. de contaminantes emitidos				
			NO _x	VOC	CH ₄	PM	CO ₂
1	490.91	123.56	4.30	0.38	0.05	0.17	387.98
2	4623.60	1063.80	37.06	3.26	0.40	1.43	3340.33
3	1102.64	223.86	7.80	0.69	0.09	0.30	702.92
Total	6217.16	1411.22	49.17	4.32	0.54	1.89	4431.23

Fuente: Elaboración propia.

Escenario 2. Centro de consolidación de carga al norte de la ciudad de Toluca.

En este escenario las distintas mercancías tienen un solo origen, el cual es un centro de consolidación de carga en la zona 7, específicamente en el AGEBS 1510600013532, considerando que esta zona tiene una actividad económica baja, una densidad de población baja y una densidad de vías alta resulta un sitio candidato para un centro de consolidación de carga que facilitaría la distribución de mercancías, ver Figura 10.

Figura 10. Simulación centro de consolidación de carga norte.



Fuente: Elaboración propia.

Al manejar mercancía de diferentes firmas, y por consiguiente de distintas características, los vehículos utilizados en este escenario fueron medianos, dada la cantidad de clientes a atender, se consideraron dos vehículos para la zona uno, 15 para la zona dos y 3 para la zona tres.

Los kilómetros recorridos disminuyen drásticamente al ejecutar la simulación con un solo origen de la mercancía que es el centro de consolidación de carga, a pesar de que son más vehículos utilizados y que son vehículos medianos, cuyo consumo de combustible es más alto que los ligeros, en comparación con el escenario actual, este escenario muestra menos kilómetros recorridos, tanto en vías congestionadas como en no congestionadas, por lo tanto, menor consumo de combustible.

Las emisiones por tanto son menores, debido a la menor cantidad de kilómetros recorridos por los vehículos de carga, en este sentido, las AGEBS pertenecientes a la zona 2 siguen representando áreas prioritarias de regulación por la demanda de mercancías y por sus características socio territoriales. Ver Tabla 10.

Tabla 10. Resultados con el CCC al norte.

Zona	Kilómetros recorridos	Consumo Kg/lt	Kg. de contaminantes				
			NO _x	VOC	CH ₄	PM	CO ₂
1	52.73	13.86	0.48	0.04	0.01	0.02	43.52
2	458.65	113.67	3.96	0.35	0.04	0.15	356.92
3	165.42	37.84	1.32	0.12	0.01	0.05	118.82
Total	676.80	165.37	5.76	0.51	0.06	0.22	519.26

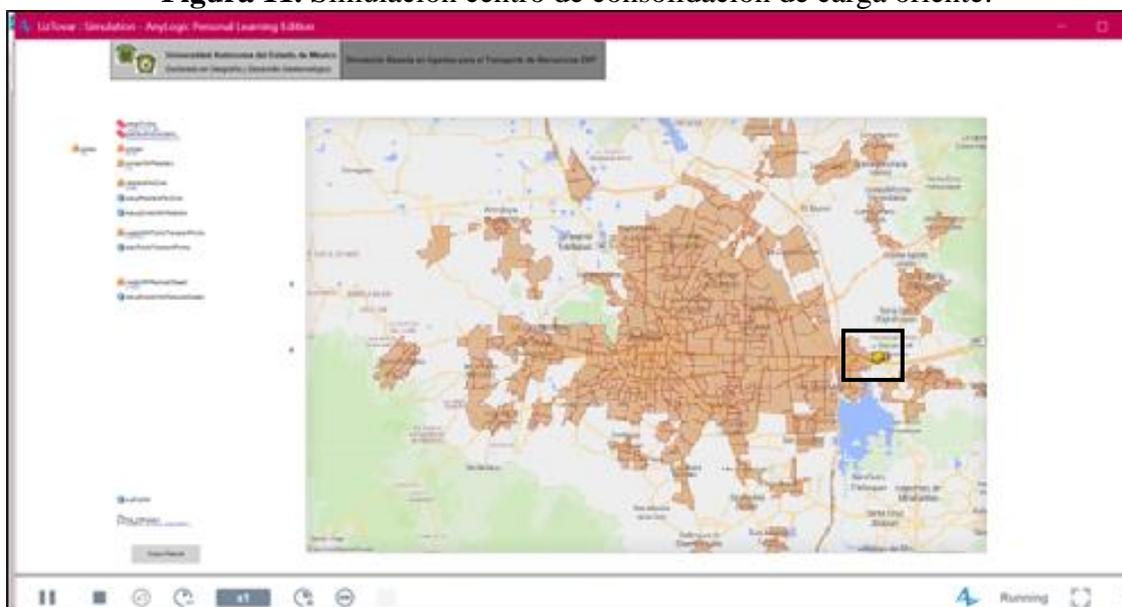
Fuente: Elaboración propia.

Escenario 3. Centro de consolidación de carga al oriente de la ciudad de Toluca.

Este centro de consolidación de carga (CCC) se planteó al oriente de la ciudad de Toluca, específicamente en el municipio de Lerma, sobre la carretera Toluca-México, considerando que esta zona tiene una actividad económica baja, una densidad de población baja y una densidad de vías alta resulta un sitio candidato para un CCC, ver

Figura 11. Los vehículos utilizados en este escenario, al igual que en anterior fueron medianos, dada la cantidad de clientes a atender, se consideraron de igual manera dos vehículos para la zona uno, 15 para la zona dos y 3 para la zona tres.

Figura 11. Simulación centro de consolidación de carga oriente.



Fuente: Elaboración propia.

Los kilómetros recorridos disminuyen en comparación a los escenarios anteriores, a pesar de que son más vehículos utilizados y que son vehículos medianos, cuyo consumo de combustible es más alto que los ligeros, en comparación con el escenario 1, este escenario también muestra un ahorro en los kilómetros recorridos, tanto en vías congestionadas como en no congestionadas, por lo tanto, menor consumo de combustible. Ver Tabla 11.

Tabla 11. Resultados con el CCC al oriente

Zona	Kilómetros recorridos	Consumo Kg/lt	Kg. de contaminantes				
			NO _x	VOC	CH ₄	PM	CO ₂
1	69.20	17.29	0.60	0.05	0.01	0.02	54.29
2	601.31	142.63	4.97	0.44	0.05	0.19	447.86
3	145.50	29.84	1.04	0.09	0.01	0.04	93.70
Total	816.01	189.76	6.61	0.58	0.07	0.25	595.86

Fuente: Elaboración propia.

Comparación de resultados

Para poder comparar el escenario actual con los escenarios alternativos y así determinar la viabilidad de alguna de las propuestas logísticas se compararon los resultados obtenidos de los kilómetros recorridos, consumo de combustible y emisiones contaminantes de cada escenario. En la Tabla 12 se resumen los kilómetros recorridos estimados para un día de entrega habitual para las zonas de alta demanda en la ZMT y para cada escenario.

Tabla 12. Comparación de los kilómetros recorridos en los diferentes escenarios.

Zonas	Kilómetros recorridos		
	Actual	CCC norte	CCC oriente
1	490.91	52.73	69.20
2	4623.60	458.65	601.31
3	1102.64	165.42	145.50
Total	6217.16	676.8	816.01

Fuente: Elaboración propia.

De manera general es posible notar que los escenarios alternativos muestran una considerable disminución de kilómetros recorridos para abastecer las misceláneas de las zonas de alta demanda en la ZMT, lo que sugiere que es viable implementar centros de consolidación de carga como alternativa para planificar y optimizar el transporte urbano de mercancías.

De manera específica, los escenarios alternativos muestran diferencias significativas en este rubro, para la Zona 1 y Zona 2, que corresponden al Centro Histórico de la ciudad de Toluca y a las cabeceras municipales respectivamente, se recorren más kilómetros con el CCC oriente que con el CCC norte. Para la zona 3, el centro de consolidación de carga en la zona norte debe recorrer más kilómetros para las entregas. Con estos resultados se puede considerar que para las zonas 1 y 2 y sería viable tener un centro de consolidación de carga al norte de la zona metropolitana, mientras que para la zona 3, es viable tener un centro de consolidación de carga en la zona oriente.

El consumo de combustible también difiere notablemente entre escenarios tal como se aprecia en la Tabla 40 mientras que el escenario actual refleja el mayor consumo de combustible, el escenario 3 muestra el menor consumo de combustible total, esto puede estar relacionado a la ubicación del centro de consolidación de carga y a las vialidades que utiliza para la distribución de mercancías al interior de la ZMT. Ver Tabla 13.

Tabla 13. Comparación del consumo de combustible en los diferentes escenarios.

Zonas	Consumo de combustible		
	Actual	CCC norte	CCC oriente
1	123.56	13.10	21.78
2	1063.80	242.04	124.34
3	223.86	43.54	34.56
Total	1411.22	298.68	180.68

Fuente: Elaboración propia.

El CCC oriente es el que muestra el menor consumo de combustible para la zona 2 y la zona 3, mientras que para la zona 1, el menor consumo está en el CCC norte, un comportamiento similar al de los kilómetros recorridos, lo que refuerza la viabilidad de considerar más de un CCC para abastecer la ZMT.

Como es de esperarse, a menor consumo de combustible, menor cantidad de emisiones contaminantes por parte de los vehículos de carga, la Tabla 14 muestra las emisiones contaminantes estimadas para cada escenario, considerando el abasto de las tres zonas de alta demanda de mercancías.

Tabla 14. Comparación de emisiones contaminantes en los diferentes escenarios.

Escenario	Kg. de contaminantes totales en las zonas de alta demanda				
	NO _x	VOC	CH ₄	PM	CO ₂
Actual	49.17	4.32	0.54	1.89	4431.23
CCC norte	5.76	0.51	0.06	0.22	519.26
CCC oriente	6.61	0.58	0.07	0.25	595.86

Fuente: Elaboración propia.

El CCC norte mantiene la menor cantidad de emisiones globales, seguido del CCC oriente, lo que permite confirmar la viabilidad de implementar una solución logística de esta naturaleza para aminorar no solo los impactos ambientales que genera el transporte urbano de mercancías en la ZMT, sino también los costos de transporte que puedan tener las empresas distribuidoras. Sin lugar a duda, las peores condiciones se tienen en el escenario actual.

Con los resultados de esta fase coinciden con el estudio de Alves, et al., (2019) ya que se llega a la conclusión de que situación actual que enfrenta la zona de estudio es la que tiene los peores resultados en comparación a los escenarios donde se simulaban soluciones logísticas, en las cuales se observan mayores beneficios, como la reducción de distancias recorridas.

CONCLUSIONES

Se puede concluir en este trabajo de investigación que analizar la demanda del transporte urbano de mercancías desde una perspectiva espacial permite tener una visión integral de las ciudades en cuanto a su dinámica de abasto de mercancías y, a su vez, una visión particular de zonas específicas según su demanda y características socio territoriales, lo cual puede convertirse en un enfoque útil e innovador para la planificación del transporte de mercancías en las ciudades.

El realizar un diagnóstico previo del territorio permite identificar zonas prioritarias para poder regular actividades y aplicar políticas pertinentes considerando no sólo la actividad per se, sino en conjunto con las características espaciales del lugar donde opera, lo que puede coadyuvar a la mejor toma de decisiones en materia de movilidad, a mejorar la eficiencia de este tipo de transporte y a prevenir o mitigar los impactos negativos que este genera, ya que, como sucede en países desarrollados, en la zona metropolitana analizada la demanda de mercancías no es homogénea al interior de la urbe, sino que varía en función de la cantidad de población, del ingreso de esta y del uso de suelo, algo que no es homogéneo en la zona de estudio, lo cual permitió comprobar la diferencia que existe al interior de las ciudades respecto a demanda de mercancías.

Una de las aportaciones de este proyecto es mostrar la viabilidad de poder vincular tecnologías de la información geográfica, específicamente un sistema de información geográfica, con un entorno de simulación, el primero permitió espacializar la información, analizarla y entender su comportamiento espacial, mientras que el segundo permitió “jugar” con las variables involucradas para poder tener un escenario alternativo al actual y poder verificar la disminución del impacto de los vehículos de carga en

términos de kilómetros recorridos, consumo de combustible y emisiones contaminantes, con la finalidad de comparar el beneficio de implantar un centro de consolidación de carga como solución logística.

La integración de SBA y SIG permite una simulación más detallada y realista, abordando la heterogeneidad de los actores del sistema de transporte de mercancías y sus interacciones complejas con el entorno urbano. Este enfoque facilita una toma de decisiones más informada y permite la experimentación con diferentes estrategias logísticas que podrían resultar difíciles y costosas de probar en la realidad. La investigación demuestra la viabilidad de implantar CCC en zonas estratégicas como una solución efectiva y sostenible para las ciudades que enfrentan problemas de congestión vehicular y altos niveles de emisiones.

La propuesta metodológica planteada en este documento abre varias líneas de investigación, una de ellas es la posibilidad de explorar diferentes opciones para realizar la zonificación, ya que en este estudio se realizó con base en los límites oficializados para levantamiento de información estadística, se sugiere viable explorar otras unidades de análisis con la finalidad de complementar los resultados que puedan obtenerse. También se sugiere plantear escenarios con soluciones logísticas distintas para poder comparar la viabilidad de las diferentes soluciones logísticas. Por último, se considera conveniente probar esta metodología en otra zona metropolitana del país con la finalidad de verificar su replicabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

Allen, J., Browne, M., & Cherrett, T. (2012). Investigating relationships between road freight transport, facility location, road freight transport, facility location. *Journal of Transport Geography*, 45-57.

Alves, R., Da Silva Lima, R., Custódio de Sena, D., Ferreira de Pinho, A., & Holguín-Veras, J. (2019). Agent-Based Simulation Model for Evaluating Urban Freight Policy to E-Commerce. *Sustainability*, 2-19.

Anand, N., Quak, H., Van Duin, R., & Tavasszy, L. (2012). City logistics modeling efforts: Trends and gaps - A review. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 101-115.

Aresti, M., Tanco, M., Jurburg, D., Moratorio, D., & Villalobos, J. (2016). Evaluación de tecnologías para la eficiencia energética en vehículos de carga por carretera. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, 35-47.

Balzarini, M., Bruno, C., Córdoba, M., & Teich, I. (2015). *Herramientas en el análisis estadístico multivariado*. Córdoba: Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba.

Bean, W., & Joubert, J. (2019). Modelling receiver logistics behavior. *Procedia*, 763–768.

Bok, M., & Tavasszy, L. (2018). An empirical agent-based simulation system for urban goods transport (MASS-GT). *Procedia Computer Science*, 126–133.

- Borshchev, A., & Grigoryev, I. (2018). *The Big Book of Simulation Modeling*. Multimethod Modeling with AnyLogic 8.
- Buzai, G., & Baxendale, C. (2012). *Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica: ordenamiento territorial, temáticas de base vectorial*. Buenos Aires: Lugar Editorial.
- Cabrera, A. (2011). *Transporte internacional de mercancías*. Madrid: Instituto Español de Comercio Exterior.
- Caselles, A. (2008). *Modelización y Simulación de Sistemas Complejos*. Valencia: Universidad de Valencia.
- De Bakshi, N., Geetam, T., & Boliac, N. (2020). Influence of urban form on urban freight trip generation. *Case Studies on Transport Policy*, 229-235.
- DENUE. (2019). Directorio Estadístico de Unidades Económicas. INEGI.
- Ducret, R., Lemarié, B., & Roset, A. (2016). Cluster analysis and spatial modeling for urban freight. Identifying homogeneous urban zones based on urban form and logistics characteristics. *Transportation Research Procedia*, 301-313.
- European Environment Agency. (2019). *Emissions of air pollutants from transport*. EEA.
- Ezquerro, S. (2020). *Modelos para una planificación y gestión eficiente del transporte urbano de mercancías*. Tesis Doctoral. Santander: Universidad de Cantabria.
- Farfán, H. (2016). *Estrategias comerciales para el sector del transporte de carga* [Tesis de Maestría]. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- García-Valdecasas, J. (2011). La simulación basada en agentes: una nueva forma de explorar los fenómenos sociales. *Reis*, 91-110.
- Gershenson, C. (2015). Sistemas Complejos. Complejidad, tecnología y sociedad. *Investigación y Ciencia*, 48-54.
- Gómez-Marín, C., Arango-Serna, M. D., & Serna-Urán, C. (2018). Agent-based microsimulation conceptual model for urban freight distribution. *Transportation Research Procedia*, 155–162.
- INEGI, (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Aguascalientes: INEGI
- Iwan, S., Kijewska, K., & Lemke, J. (2016). Analysis of parcel lockers' efficiency as the last mile delivery solution – the results of the research in Poland. *Transportation Research Procedia*, 644-655.
- Kawamura, K. (2011). *Understanding Freight-Built Environment Interrelationships*. Chicago: CFIRE.

Novak, D., Hodgdon, C., Guo, F., & Aultman-Hall, L. (2011). Nationwide Freight Generation Models: A Spatial Regression Approach. *Networks and Spatial Economics*, 23-41.

Sánchez-Díaz, I., Holguín-Veras, J., & Wang, X. (2014). An exploratory analysis of spatial effects on freight trip attraction. *Transportation*, 177-196.

SEDATU, CONAPO, & INEGI. (2024). Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México. Ciudad de México: SEDATU, CONAPO, INEGI.

SEMARNAT, INEEC (2014). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México.

Sopha, B., Siagian, A., & Sri, A. (2016). Simulating Dynamic Vehicle Routing Problem Using Agent-Based Modeling and Simulation. *International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 1335-1339.

Vélez, Á. (2019). Modelación y simulación basada en agentes en ciencias sociales: una aproximación al estado del arte. *Polis Revista Latinoamericana*, 1-21.

Venkadavarahan, M., & Marisamynathan, S. (2021). Analyzing Urban Freight System, Supply Chain Characteristics and Temporal Travel Pattern in Indian context. *Case Studies on Transport Policy*, 348-361.

Wygonik, E., & Goodchild, A. (2018). Urban form and last-mile goods movement: Factors affecting vehicle miles travelled and emissions. *Transportation Research Part D*, 217-229.

© Lizbeth Tovar Plata, Raquel Hinojosa Reyes, Juan Campos Alanís y Edel Cadena Vargas.

Tovar Plata, L.; Hinojosa Reyes, R.; Campos Alanís, J.; Cadena Vargas, E. (2024). Sistemas de Información Geográfica y Simulación basada en Agentes para el estudio del transporte urbano de mercancías en la Zona Metropolitana de Toluca. ***Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GeoSIG)***. 16(29) Sección I: Artículos. pp. 1-25.

On-line: www.revistageosig.wixsite.com/geosig

Recibido: 28 de junio de 2024

Aceptado: 15 de septiembre de 2024