



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

INVESTIGACIÓN EN INGENIERIA CIVIL

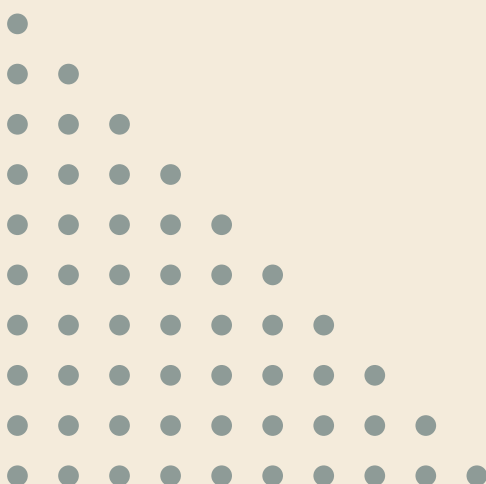
TESIS

DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA SOBRE

CONGESTIÓN VEHICULAR Y MOVILIDAD
SOSTENIBLE EN TULANCINGO, HIDALGO:
DIAGNÓSTICO VIAL Y PROPUESTAS

PRESENTA

CARLOS ALBERTO
RAMIREZ GUTIERREZ



DIRECTOR: DR. HUMBERTO IVÁN NAVARRO GÓMEZ

CODIRECTOR: DR. CHRISTOPHER SÁNCHEZ RESÉNDIZ

ASESORES:

DR. ÉBER PÉREZ ISIDRO

DR. CUTBERTO RODRÍGUEZ ÁLVAREZ

PACHUCA DE SOTO, MAYO 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences
Dirección
Office of the Director

Mineral de la Reforma, Hgo., a 5 de mayo de 2026

Número de control: ICBI-D/899/2026
Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UA EH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Ingeniería Civil **Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez**, quien presenta el trabajo de titulación **"Congestión vehicular y movilidad sostenible en Tulancingo, Hidalgo: diagnóstico vial y propuestas"**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Eber Pérez Isidro

Secretario: Dr. Humberto Iván Navarro Gómez

Vocal: Dr. Cutberto Rodríguez Álvarez

Suplente: Dr. Christopher Sánchez Reséndiz

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P 42184
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

GVR/MMM

"Amor, Orden y Progreso"



uaeh.edu.mx

CONTENIDO

GLOSARIO DE TÉRMINOS	6
RELACIÓN DE ILUSTRACIONES, MAPAS Y GRÁFICOS	10
Ilustraciones	10
Mapas.....	12
Gráficos	13
Tablas.....	14
Figuras	14
RESUMEN.....	15
ABSTRACT	16
INTRODUCCIÓN.....	17
ANTECEDENTES.....	19
JUSTIFICACIÓN.....	22
OBJETIVO GENERAL	24
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	27
HIPÓTESIS	28
METODOLOGÍA	29
MARCO TEÓRICO	40
CAPÍTULO I.....	40
1.1 Movilidad urbana integral	43
1.2 Rediseño vial integral.....	45
1.3 Ciclovías como infraestructura integral	46
1.4 Andadores peatonales y movilidad activa	50
1.5 Corredores de transporte público.....	52

1.6 Gestión del tráfico y sistemas inteligentes de transporte.....	54
1.7 Integración multimodal.....	56
1.8 Congestión vehicular y capacidad vial	57
CAPÍTULO II.....	59
2.1 Fundamentos del análisis de tránsito vehicular.....	59
2.2 Capacidad y nivel de servicio de una vía	60
2.3 Diseño geométrico vial.....	62
2.4 Intersecciones y su influencia en la congestión.....	64
2.5 Factores que inciden en la congestión vehicular.....	65
2.6 Enfoques modernos de mitigación de congestión	66
CAPÍTULO III.....	68
3.1 Localización geográfica y contexto regional.....	68
3.2 Fisiografía, relieve y clima.....	69
3.3 Geología y tipo de suelo	71
3.4 Hidrografía y recursos naturales	72
3.5 Estructura demográfica y socioeconómica.....	73
3.6 Estructura urbana y uso del suelo.....	74
3.7 Equipamiento urbano y servicios	76
3.8 Sistema vial y transporte.....	77
3.9 Problemática urbana y ambiental vinculada a la movilidad	80
3.10 Síntesis del contexto municipal	83
CAPÍTULO IV	84
4.1 Introducción	84
4.2 Caracterización general del tránsito vehicular.....	84
4.3 Resultados de los aforos vehiculares.....	88
4.4 Tiempos de recorrido y velocidades de operación	93
4.5 Análisis de intersecciones críticas.....	93

4.6 Factores que inciden en la congestión	96
4.7 Impactos de la congestión vehicular	97
4.8 Diagnóstico integral de la movilidad urbana	98
4.9 Limitaciones del estudio	99
4.10 Percepción ciudadana sobre el transporte público y la movilidad urbana	100
4.11 Discusión	106
4.12 Conclusiones parciales	109
CAPÍTULO V	110
5.1 Integración de un semáforo en la intersección Miguel Hidalgo – Luis M. Ponce con operación en horas pico.....	111
5.2 Integración y sincronización de un semáforo en la intersección Miguel Hidalgo – Benito Juárez.....	112
5.3 Instalación de un semáforo en la intersección Avenida Gilberto Gómez Carbajal – Libramiento Tulancingo–Santiago Tulantepec	113
5.4 Propuesta de implementación de semáforo peatonal en la intersección de la calle Manuel Fernando Soto con calle Miguel Hidalgo	114
5.5 Propuesta integral de red de ciclovías urbanas y metropolitanas en Tulancingo, Hidalgo	115
5.6 Propuesta de apertura y habilitación de vialidad urbana en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo	120
CONCLUSIONES	122
REFERENCIAS	125
ANEXO A.....	130
ANEXO B.....	131
ANEXO C	132

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aforo vehicular: Conteo sistemático del número de vehículos que circulan por una vía o una intersección durante un periodo determinado. Sirve para calcular la demanda de tránsito y determinar los niveles de servicio o la capacidad vial.

Análisis de capacidad vial: Evaluación del desempeño de una vía o intersección en función del volumen de tránsito que puede atender bajo condiciones específicas de diseño, señalización y control.

Andador peatonal: Espacio vial o franja urbana destinado exclusivamente al desplazamiento de peatones. Puede ser lineal (tipo corredor) o formar parte de zonas peatonales prioritarias.

Área urbana consolidada: Zona de la ciudad con continuidad edificada, infraestructura básica completa y funciones urbanas mixtas (habitacionales, comerciales y de servicios).

Cambio modal / Modal Shift: Proceso mediante el cual los usuarios sustituyen un modo de transporte por otro más eficiente o sostenible, por ejemplo, al pasar del automóvil particular al transporte público o a la bicicleta.

Capacidad vial: Volumen máximo de vehículos que puede circular por una vía o intersección en una hora determinada sin que se produzca congestión excesiva. Se expresa comúnmente en vehículos por hora por carril (veh/h/c).

Carril preferencial: Franja de la calzada destinada al uso prioritario de un tipo de vehículo, como autobuses o bicicletas, con el fin de mejorar la eficiencia del transporte colectivo o no motorizado.

Ciclo semafórico / Signal Cycle: Tiempo total necesario para completar todas las fases de un semáforo. Incluye periodos verdes, amarillos y rojos para todos los movimientos vehiculares y peatonales.

Ciclovia: Infraestructura vial diseñada específicamente para la circulación segura de bicicletas. Puede ser exclusiva (segregada del tránsito vehicular) o compartida (con señalización horizontal y vertical).

Congestión vehicular: Situación en la que el flujo de vehículos excede la capacidad de una vía, lo que provoca una disminución de las velocidades, un aumento de los tiempos de recorrido y un mayor consumo de energía.

Control semafórico actuado / Actuated Control: Sistema de semaforización que adapta la duración de las fases de luz verde según la presencia de vehículos o peatones detectados por sensores o cámaras.

Crecimiento urbano disperso / Urban Sprawl: Patrón de expansión de la ciudad caracterizado por baja densidad, separación funcional de los usos del suelo y alta dependencia del automóvil. Se asocia con mayores costos de infraestructura y movilidad.

Demanda de transporte: Número de viajes generados por la población en un área urbana durante un periodo determinado. Depende de variables socioeconómicas, de la localización y de la oferta de transporte.

Desfase semafórico / Offset: Diferencia temporal programada entre el inicio de la luz verde de una intersección y el de la siguiente, con el fin de coordinar varios semáforos a lo largo de un corredor (“onda verde”).

Diseño geométrico vial: Conjunto de principios de ingeniería que determinan la forma, las dimensiones y las características físicas de una vía (alineamientos, radios, pendientes, visibilidad, secciones transversales, etc.).

Eficiencia energética en el transporte: Relación entre la energía consumida (por ejemplo, litros de gasolina) y el número de pasajeros o de toneladas transportadas. Una mayor eficiencia implica un menor consumo por unidad transportada.

Emisiones contaminantes: Sustancias liberadas al ambiente por los vehículos, principalmente dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas suspendidas (PM₁₀, PM_{2.5}).

Equipamiento urbano: Conjunto de instalaciones físicas destinadas a satisfacer necesidades colectivas como lo son escuelas, hospitales, centros de abasto, espacios deportivos, etc.

Flujo vehicular / Traffic Flow: Cantidad de vehículos que pasan por un punto dado en un periodo determinado. Se analiza en términos de volumen, densidad y velocidad promedio.

Gestión de la demanda de transporte (GDT): Estrategia que busca modificar los patrones de viaje y reducir la necesidad de desplazamientos motorizados mediante medidas de planeación, tarifas, teletrabajo, incentivos o cambios modales.

Infraestructura vial: Conjunto de elementos físicos que conforman una vía como lo son calzadas, banquetas, ciclovías, drenaje, señalización, alumbrado y estructuras de soporte.

Ingeniería de tránsito: Rama de la ingeniería civil que estudia el movimiento seguro y eficiente de personas y vehículos en la vía pública, mediante el diseño, control y operación del sistema vial.

Intermodalidad: Posibilidad de combinar diferentes modos de transporte en un mismo viaje, por ejemplo, bicicleta + transporte público, o automóvil + autobús.

ITS – Intelligent Transport Systems: Sistemas inteligentes de transporte. Conjunto de tecnologías electrónicas y de comunicación aplicadas al control del tránsito y gestión de la movilidad (sensores, cámaras, software de sincronización, etc.).

Jerarquía vial: Clasificación funcional de las vías urbanas según su papel en la red: primarias, secundarias, colectoras y locales. Determina la prioridad de paso y el diseño geométrico apropiado.

Movilidad activa: Desplazamientos realizados a pie o en bicicleta, principalmente, promoviendo la salud, la eficiencia energética y la reducción de emisiones.

Movilidad sostenible / Sustainable Mobility: Modelo de transporte que busca satisfacer las necesidades de desplazamiento sin comprometer el medio ambiente ni la equidad social, privilegiando los modos no motorizados y el transporte público eficiente.

Nivel de servicio (LOS – Level of Service): Indicador cualitativo del desempeño del tránsito en una vía o intersección, expresado mediante letras de la A (fluido) a la F (colapsado), de acuerdo con el Highway Capacity Manual (HCM).

Onda verde / Green Wave: Coordinación semafórica que permite a los vehículos circular por un corredor urbano recibiendo luces verdes consecutivas si mantienen una velocidad determinada.

Parque vehicular: Conjunto de vehículos motorizados registrados en circulación dentro de un área geográfica. Su crecimiento suele estar correlacionado con la congestión y las emisiones urbanas.

HCM: Highway Capacity Manual, manual técnico utilizado para analizar capacidad, demora y nivel de servicio en instalaciones viales.

Hora pico / Peak hour: Periodo del día en el que se registran los mayores volúmenes de tránsito y de demanda de transporte. En esta tesis se definieron dos horarios pico: de 7:00 a 09:00 y de 16:00 a 18:00 horas.

Plan Integral de Movilidad Urbana Sustentable: Instrumento de planeación que integra políticas, proyectos y estrategias para optimizar el sistema de movilidad en una ciudad o en una zona metropolitana.

Rediseño vial sostenible: Proceso de reconfiguración de las calles urbanas bajo criterios de seguridad, eficiencia y sustentabilidad, que incluye espacio para peatones, ciclistas, transporte público y vehículos privados.

Seguridad vial: Conjunto de acciones, medidas e infraestructuras orientadas a prevenir accidentes de tránsito y reducir sus consecuencias en personas y bienes.

Semaforización: Instalación de dispositivos luminosos que regulan el paso de vehículos y peatones en intersecciones, pasos peatonales y accesos conflictivos.

Sistemas de transporte público: Servicios organizados de traslado colectivo de pasajeros, operados según rutas y horarios definidos. Incluye autobuses, minibuses y transporte suburbano.

Sostenibilidad urbana: Principio de planificación que busca equilibrar el crecimiento económico, la equidad social y la protección ambiental en el desarrollo de las ciudades.

Transporte troncal–alimentador: Modelo operativo en el que rutas principales (troncales) concentran la demanda sobre corredores estructurantes y rutas secundarias (alimentadoras) conectan las zonas periféricas.

Transporte no motorizado: Modos de desplazamiento que no requieren motor: caminar, usar bicicleta o dispositivos de movilidad personal. Promueven salud, inclusión y eficiencia energética.

TRB: Transportation Research Board, organismo responsable de la publicación del Highway Capacity Manual.

Generación de viajes / Trip generation: Etapa del análisis de transporte que determina cuántos viajes produce o atrae una zona en función de su uso de suelo, población y actividad económica.

Urbanización: Proceso de transformación del territorio rural en urbano mediante la instalación de infraestructura, servicios y usos de suelo urbanos.

V/C: Relación Volumen/Capacidad que se traduce como el cociente adimensional que compara la demanda vehicular con la capacidad estimada, los valores cercanos o superiores a 1 indican saturación.

Vehículo equivalente (PCU – Passenger Car Unit): Unidad de medida empleada para convertir distintos tipos de vehículos (camiones, autobuses, motocicletas) a un valor equivalente a un automóvil estándar para fines de capacidad vial.

Visibilidad de parada / Stopping Sight Distance: Distancia mínima requerida para que un conductor perciba un obstáculo y detenga el vehículo con seguridad, determinada por la velocidad de diseño y condiciones de fricción del pavimento.

Zona de influencia: Área geográfica afectada directamente por una intervención de transporte o de infraestructura vial, ya sea por la mejora de la accesibilidad, la redistribución del tráfico o los impactos ambientales.

RELACIÓN DE ILUSTRACIONES, MAPAS Y GRÁFICOS

Ilustraciones

- Ilustración 1. Infraestructura ciclista existente en Tulancingo, Hidalgo. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).
- Ilustración 2. Infraestructura ciclista en Boulevard Emiliano Zapata, Tulancingo, Hidalgo. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).
- Ilustración 3. Condiciones de la ciclovía en Tulancingo, Hidalgo. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).
- Ilustración 4. Segmento de ciclovía urbana en Tulancingo, Hidalgo. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).
- Ilustración 5. Condiciones del Boulevard Bicentenario, Tulancingo, Hidalgo. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).
- Ilustración 6. Infraestructura ciclista en la zona urbana de Tulancingo, Hidalgo. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).
- Ilustración 7. Condiciones de movilidad ciclista en Tulancingo, Hidalgo. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).
- Ilustración 8. Corredor de transporte público Tuzobús en el Estado de Hidalgo. Fuente: fotografía de Mayra Silvia Navarrete Aldana (2023).
- Ilustración 9. Congestión vehicular en la hora pico en Tulancingo, Hidalgo. Fuente: La Nota Hidalguense (2024).
- Ilustración 10. Congestión vehicular en la calle Benito Juárez, en Tulancingo, Hidalgo. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).
- Ilustración 11. Congestión vehicular en la calle Manuel Fernando Soto, en Tulancingo, Hidalgo. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).
- Ilustración 12. Condiciones de la infraestructura semafórica en Tulancingo, Hidalgo. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).
- Ilustración 13. Estado de los semáforos urbanos en Tulancingo, Hidalgo. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).
- Ilustración 14. Infraestructura semafórica en intersecciones urbanas de Tulancingo, Hidalgo. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).
- Ilustración 15. Congestión vehicular en la calle Benito Juárez, en Tulancingo, Hidalgo. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).

-
- Ilustración 16. Congestión vehicular en el Boulevard Emiliano Zapata, Tulancingo, Hidalgo. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).
 - Ilustración 17. Congestión vehicular en la calle Manuel Fernando Soto, en Tulancingo, Hidalgo. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).
 - Ilustración 18. Condiciones de tráfico en la calle Manuel Fernando Soto durante la hora pico. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).
 - Ilustración 19. Intersección urbana con alta congestión vehicular en Tulancingo, Hidalgo. Fuente: El Universal Hidalgo (2024).
 - Ilustración 20. Congestión vehicular en la calle Manuel Fernando Soto, en Tulancingo, Hidalgo. Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).

Mapas

- Mapa 1. Localización geográfica del municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo. Fuente: Ayuntamiento de Tulancingo (2015).
- Mapa 2. Climatología del municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo. Fuente: Actualización del Atlas de Riesgos del Municipio de Tulancingo (2017).
- Mapa 3. Uso actual del suelo en la cabecera municipal de Tulancingo de Bravo, Hidalgo. Fuente: Actualización del Atlas de Riesgos del Municipio de Tulancingo (2017).
- Mapa 4. Distribución de semáforos en funcionamiento en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo. Fuente: elaboración propia con base en un levantamiento de campo (2025).
- Mapa 5. Vialidades con alta carga vehicular según la jerarquía vial en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo. Fuente: elaboración propia con base en el análisis vial (2025).
- Mapa 6. Red propuesta de ciclovías urbanas y metropolitanas en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo. Fuente: elaboración propia.
- Mapa 7. Propuesta de apertura y habilitación de nuevas vialidades urbanas en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo. Fuente: elaboración propia.

Gráficos

- Gráfico 1. Volumen vehicular en hora pico (veh/h) en las intersecciones analizadas de Tulancingo, Hidalgo. Fuente: elaboración propia con base en los aforos vehiculares (2025).
- Gráfico 2. Composición del tránsito vehicular por tipo de vehículo en la intersección Boulevard Emiliano Zapata – 21 de marzo (veh/h). Fuente: elaboración propia con base en los aforos vehiculares (2025).
- Gráfico 3. Composición del tránsito vehicular por tipo de vehículo en la intersección Boulevard Bicentenario – Avenida Tomás Alva Edison (veh/h). Fuente: elaboración propia con base en los aforos vehiculares (2025).
- Gráfico 4. Composición del tránsito vehicular por tipo de vehículo en la intersección de Libramiento a Cuauhtémoc – calle Primero de Abril (veh/h). Fuente: elaboración propia con base en los aforos vehiculares (2025).
- Gráfico 5. Frecuencia de uso del transporte público en la muestra encuestada en Tulancingo, Hidalgo (n = 200). Fuente: elaboración propia.
- Gráfico 6. Percepción de la calidad del servicio del transporte público en Tulancingo, Hidalgo (n = 200). Fuente: elaboración propia.
- Gráfico 7. Principales problemas del transporte público identificados por los usuarios en Tulancingo, Hidalgo (n = 200). Fuente: elaboración propia.
- Gráfico 8. Percepción de competitividad del transporte público frente al automóvil particular en Tulancingo, Hidalgo (n = 200). Fuente: elaboración propia.
- Gráfico 9. Medio de transporte más utilizado por la muestra encuestada en Tulancingo, Hidalgo (n = 200). Fuente: elaboración propia.
- Gráfico 10. Percepción del impacto de la congestión vehicular sobre la calidad de vida en la muestra encuestada en Tulancingo, Hidalgo (n = 200). Fuente: elaboración propia.
- Gráfico 11. Acciones consideradas más efectivas para reducir la congestión vehicular por la muestra encuestada en Tulancingo, Hidalgo (n = 200). Fuente: elaboración propia.
- Gráfico 12. Disposición de la muestra encuestada a reducir el uso del automóvil si se mejora el transporte público en Tulancingo, Hidalgo (n = 200). Fuente: elaboración propia.

-
- Gráfico 13. Percepción de seguridad al desplazarse a pie o en bicicleta en la muestra encuestada en Tulancingo, Hidalgo (n = 200). Fuente: elaboración propia.
 - Gráfico 14. Prioridades identificadas por la muestra encuestada para mejorar la movilidad urbana en Tulancingo, Hidalgo (n = 200). Fuente: elaboración propia.

Tablas

- Tabla 1. Matriz de congruencia de la investigación. Fuente: elaboración propia.
- Tabla 2. Cronograma de actividades. Fuente: elaboración propia.
- Tabla 3. Ejes comparativos. Fuente: elaboración propia.

Figuras

- Figura metodológica 1. Red de precedencias (CPM) del desarrollo de la tesis. Fuente: elaboración propia.
- Figura metodológica 2. Cronograma derivado de la ruta crítica (CPM). Fuente: elaboración propia.
- Figura teórica 3. Modelo analítico integrador de la investigación. Fuente: elaboración propia.

RESUMEN

En esta investigación se evaluó la congestión vehicular en los principales corredores urbanos de la ciudad mediante aforos vehiculares en hora pico, análisis de capacidad y de nivel de servicio en intersecciones críticas, tiempos de recorrido y una encuesta de percepción y uso modal. Se identificaron periodos de saturación operativa (valores V/C cercanos o superiores a 1 en puntos específicos) y demoras asociadas a fricción por paradas informales, maniobras de ascenso y descenso, cruces peatonales no canalizados y falta de gestión semafórica en nodos clave. Con base en los hallazgos, se jerarquizaron alternativas de movilidad urbana eficiente que integran seguridad vial y accesibilidad peatonal y ciclista, priorizadas por impacto esperado y factibilidad de implementación, incluyendo: (i) implementación y coordinación de semáforos en intersecciones estratégicas, (ii) semaforización peatonal en el centro histórico, (iii) apertura de conexiones viales para redistribuir flujos y (iv) infraestructura ciclista continua en tramos estratégicos. Los resultados aportan una ruta de intervención incremental para reducir las demoras y mejorar la seguridad vial, sin depender exclusivamente de ampliaciones viales.

Palabras clave: congestión; movilidad sostenible; capacidad vial; intersecciones; seguridad vial.

ABSTRACT

This research evaluated traffic congestion along the city's main urban corridors using peak-hour traffic counts, capacity and level-of-service analyses at critical intersections, travel time measurements, and a perception/modal-use survey. Periods of operational saturation were identified (V/C ratios close to or exceeding 1 at specific locations), along with delays due to friction from informal stops, passenger boarding and alighting maneuvers, uncontrolled pedestrian crossings, and the lack of traffic signal management at key nodes. Based on the findings, sustainable mobility alternatives integrating road safety and pedestrian/cyclist accessibility were prioritized according to their expected impact and implementation feasibility. These alternatives include: (i) installation and coordination of traffic signals at strategic intersections, (ii) pedestrian signalization in the historic center, (iii) opening of new urban connections to redistribute traffic flows, and (iv) continuous cycling infrastructure along strategic segments. The results provide a roadmap for incremental interventions to reduce delays and improve road safety without relying exclusively on road widening.

Keywords: congestion; sustainable mobility; road capacity; intersections; road safety.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano acelerado y el incremento del parque vehicular han generado importantes desafíos para la movilidad en ciudades de todo el mundo. Durante las últimas décadas, la expansión territorial de las ciudades y la priorización histórica del automóvil particular han contribuido a la aparición de problemas como la congestión vehicular, el incremento de los tiempos de traslado y el deterioro ambiental. En América Latina, estas dinámicas han sido especialmente visibles debido a procesos de urbanización rápida, desigualdad territorial y limitaciones en la planificación del transporte urbano (ONU-Hábitat, 2020).

En México, la expansión urbana registrada desde la segunda mitad del siglo XX se ha caracterizado por el crecimiento de áreas periféricas de baja densidad y por la dispersión de desarrollos habitacionales. Este modelo urbano ha fortalecido la dependencia del automóvil y ha generado presiones significativas sobre la infraestructura vial existente (SEDATU, 2019; CONAVI, 2020). Como resultado, numerosas ciudades enfrentan actualmente problemas de saturación vial, tiempos de traslado elevados y dificultades para integrar modos de transporte más sostenibles.

En este contexto, la movilidad urbana debe abordarse con un enfoque integral que priorice la seguridad vial, la accesibilidad y la sostenibilidad. En México, este enfoque está respaldado por la Ley General de Movilidad y Seguridad Vial (Gobierno de México, 2022) y el Manual de Calles (SEDATU, 2019a), que establecen principios orientados a la protección de los usuarios vulnerables y a la gestión eficiente del sistema de transporte. Asimismo, instrumentos técnicos como el Manual de Calles promueven criterios de diseño urbano enfocados en la jerarquía vial, la seguridad peatonal y ciclista, y la reducción de conflictos en intersecciones.

La ciudad de Tulancingo de Bravo, Hidalgo, no es ajena a estas dinámicas. Durante las últimas décadas ha experimentado un crecimiento urbano acompañado de un aumento significativo del parque vehicular, mientras que la infraestructura vial y las alternativas de movilidad han evolucionado a un ritmo más lento. Esta situación ha generado congestión recurrente en diversos corredores urbanos, especialmente durante las horas de mayor demanda.

Ante este escenario, la presente investigación tiene como objetivo analizar la relación entre el crecimiento urbano y la congestión vehicular en los principales corredores urbanos de Tulancingo, mediante el estudio de los volúmenes de tránsito, las condiciones operativas de las intersecciones y los patrones de movilidad. Asimismo, se busca identificar alternativas de movilidad urbana eficiente que contribuyan a mejorar la eficiencia del sistema vial y la calidad de vida de los habitantes.

El documento se organiza en cinco capítulos principales. El primero presenta el marco conceptual de la movilidad urbana y la relación entre el crecimiento urbano y la congestión vehicular. El segundo aborda los fundamentos técnicos de la ingeniería vial y el análisis del tránsito. El tercero describe el contexto territorial, urbano y vial del municipio de Tulancingo. El cuarto capítulo presenta el análisis de resultados y el diagnóstico de la movilidad urbana a partir de los aforos vehiculares y de la percepción ciudadana. Finalmente, el quinto capítulo presenta un conjunto de propuestas orientadas a mejorar la eficiencia del sistema vial y promover alternativas de movilidad integral.

ANTECEDENTES

La congestión vehicular se ha consolidado como uno de los principales retos de la movilidad urbana contemporánea. Diversos estudios han señalado que este fenómeno está estrechamente relacionado con procesos de urbanización acelerada, la expansión territorial de las ciudades y el crecimiento sostenido del parque vehicular. En América Latina, estas tendencias se han intensificado debido a la combinación de crecimiento demográfico, desarrollo urbano disperso y una fuerte dependencia del automóvil privado como principal medio de transporte (ONU-Hábitat, 2020).

En el caso de México, la configuración urbana de muchas ciudades durante las últimas décadas ha estado marcada por la expansión hacia zonas periféricas y la construcción de desarrollos habitacionales alejados de los centros urbanos. Investigaciones de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU, 2019b) y de la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI, 2020) señalan que este modelo urbano ha contribuido a incrementar las distancias de desplazamiento y a fortalecer la dependencia del automóvil, lo que ha generado presiones significativas sobre la infraestructura vial y el sistema de transporte público.

Como consecuencia, en diversas ciudades del país, los tiempos promedio de traslado han aumentado considerablemente y la congestión vehicular se ha convertido en un problema recurrente.

En este contexto, las ciudades intermedias también han comenzado a experimentar dinámicas similares a las observadas en las grandes áreas metropolitanas. La Zona Metropolitana de Tulancingo (ZMT) ha registrado en las últimas dos décadas un crecimiento poblacional y territorial acompañado de un incremento importante del parque vehicular.

De acuerdo con datos de DataMéxico (2023), el número de vehículos en circulación prácticamente se duplicó entre 2005 y 2020, pasando de aproximadamente 35 000 a más de 70 000 unidades. Sin embargo, la infraestructura vial del municipio no ha experimentado transformaciones proporcionales, lo que ha generado saturación en diversas vialidades primarias.

Entre los corredores urbanos con mayores niveles de demanda se encuentran el Boulevard Emiliano Zapata y la Calle Miguel Hidalgo, que funcionan como ejes principales de conexión entre distintas zonas de la ciudad. En estos corredores se concentran actividades comerciales, servicios y flujos de transporte público, lo que genera conflictos operativos asociados a maniobras de ascenso y descenso de pasajeros, cruces peatonales y alta densidad vehicular durante las horas pico.

Diversos instrumentos de planeación han reconocido estas problemáticas. El Plan Integral de Movilidad Urbana Sustentable (PIMUS Tulancingo, 2018) identificó deficiencias estructurales en el sistema de movilidad local, entre ellas la falta de integración entre los distintos modos de transporte, la insuficiencia del transporte público, con cerca de 987 unidades de baja capacidad en operación, y la carencia de infraestructura adecuada para peatones y ciclistas. Asimismo, el diagnóstico señala la presencia de banquetas discontinuas, ciclovías en estado deficiente y la ocupación del espacio peatonal por vehículos o por mobiliario urbano, factores que limitan la diversificación de los modos de transporte.

Por su parte, el Plan Municipal de Desarrollo 2020–2024 reconoce la necesidad de fortalecer la movilidad urbana mediante la rehabilitación de las vialidades, la modernización del transporte público y la mejora de la accesibilidad en el centro de la ciudad. Sin embargo, a pesar de estos diagnósticos y propuestas, la congestión vehicular continúa siendo una problemática persistente en el municipio.

Las experiencias internacionales muestran que es posible enfrentar estos desafíos mediante estrategias integrales de movilidad urbana eficiente. Ciudades como Curitiba, Bogotá y Santiago de Chile han implementado políticas orientadas a fortalecer el transporte público, mejorar la infraestructura para peatones y ciclistas y gestionar la demanda de viajes, obteniendo resultados positivos en la reducción de la congestión y en la mejora de la calidad de vida urbana (ONU-Hábitat, 2020; Papadakis et al., 2024).

A pesar de estos avances en distintas ciudades, la literatura académica sobre la movilidad urbana en México ha tendido a centrarse en las grandes áreas metropolitanas. En contraste, las ciudades intermedias, que concentran una proporción creciente de la población urbana, han recibido menor atención en los estudios especializados. Esta situación genera un vacío

de conocimiento respecto a los procesos de movilidad y de congestión que se desarrollan en estos contextos urbanos.

En este sentido, el estudio de la relación entre el crecimiento urbano y la congestión vehicular en Tulancingo resulta relevante para comprender las dinámicas de movilidad en ciudades intermedias mexicanas e identificar alternativas de intervención que mejoren la eficiencia del sistema de transporte y promuevan formas de movilidad más sostenibles.

JUSTIFICACIÓN

La presente investigación surge de la necesidad de comprender y atender de manera integral la problemática de la congestión vehicular en la ciudad de Tulancingo, Hidalgo, en estrecha relación con los procesos de crecimiento urbano registrados en las últimas décadas.

La congestión vehicular no constituye únicamente un inconveniente cotidiano para los habitantes, sino que representa un obstáculo estructural para el desarrollo económico, social y ambiental del municipio. La saturación de vialidades primarias y secundarias genera pérdidas de tiempo en los desplazamientos, incrementa el consumo de combustibles fósiles, eleva los costos de transporte y contribuye al deterioro de la calidad del aire, lo que repercute directamente en la competitividad urbana y en la salud pública (SEMARNAT, 2021; DataMéxico, 2023).

En este contexto, resulta necesario realizar investigaciones que permitan comprender las causas y las manifestaciones locales de la congestión vehicular. En Tulancingo, este fenómeno refleja la falta de integración entre la planeación territorial y la gestión de la movilidad urbana. Aunque el municipio cuenta con instrumentos de planeación como el Plan Integral de Movilidad Urbana Sustentable (PIMUS Tulancingo, 2018), su implementación ha sido limitada y no ha logrado revertir las tendencias de saturación vial.

Asimismo, las políticas nacionales de desarrollo urbano y vivienda promovidas por SEDATU (2019b) y CONAVI (2020) plantean la necesidad de impulsar ciudades más compactas y sistemas de transporte eficientes; sin embargo, los municipios intermedios suelen enfrentar restricciones institucionales y presupuestales que dificultan la aplicación efectiva de estas directrices. En este sentido, la presente investigación contribuye a suplir la escasez de diagnósticos específicos sobre la movilidad urbana en ciudades intermedias como Tulancingo.

Desde el punto de vista académico y disciplinar, el estudio aporta conocimiento al campo del urbanismo y de la ingeniería de transporte al analizar la relación entre el crecimiento urbano y la congestión vehicular en una ciudad intermedia mexicana. Mientras que gran parte de la literatura nacional se concentra en grandes áreas metropolitanas como Ciudad de México, Guadalajara o Monterrey, los municipios de tamaño medio han recibido menor atención en

las investigaciones especializadas, a pesar de experimentar dinámicas urbanas similares. Por ello, esta tesis aporta evidencia empírica sobre las condiciones de movilidad en Tulancingo y propone alternativas de movilidad sostenible adaptadas a su escala urbana y a sus características territoriales (Giesen et al., 2025; ONU-Hábitat, 2020).

La investigación también se justifica desde una perspectiva metodológica, ya que integra distintas herramientas de análisis propias de la ingeniería de transporte y de la planificación urbana.

El estudio combina aforos vehiculares en hora pico, análisis de capacidad y de nivel de servicio en intersecciones críticas, evaluación de tiempos de recorrido y una encuesta de percepción y uso modal. Este enfoque permite obtener un diagnóstico integral de las condiciones de movilidad urbana y fundamentar propuestas orientadas a mejorar la eficiencia del sistema vial y la seguridad de los distintos usuarios de la vía pública.

Los resultados del estudio pueden servir de insumo para diversos actores. En primer lugar, los habitantes de Tulancingo se beneficiarían indirectamente mediante la generación de propuestas orientadas a reducir los tiempos de traslado, mejorar la seguridad vial y promover formas de movilidad más sostenibles. En segundo lugar, el gobierno municipal y las instituciones estatales dispondrían de información técnica que podría fortalecer la formulación y la actualización de políticas públicas de movilidad.

Finalmente, los profesionales de la planeación urbana, la ingeniería civil y la gestión territorial contarían con un estudio de caso que podría servir de referencia para la aplicación de estrategias de movilidad sostenible en ciudades intermedias con características similares.

La investigación resulta factible debido a que las alternativas propuestas se basan en estrategias de movilidad sostenible que han demostrado resultados positivos en diversas ciudades latinoamericanas, como Curitiba, Bogotá y Santiago de Chile (ONU-Hábitat, 2020; Papadakis et al., 2024). Estas experiencias evidencian que es posible mejorar las condiciones de movilidad urbana mediante intervenciones graduales que prioricen el transporte público, la movilidad activa y la gestión eficiente del espacio vial.

En el caso de Tulancingo, muchas de estas acciones pueden implementarse sin requerir grandes inversiones en infraestructura, sino mediante la reorganización del espacio público, la mejora de la seguridad vial y la optimización de los recursos existentes (SEDATU, 2019a; ONU-Hábitat, 2020).

En síntesis, esta investigación se justifica por su relevancia social, urbana y académica, al contribuir a la comprensión de la congestión vehicular en una ciudad intermedia mexicana y al proponer alternativas viables de movilidad sostenible que pueden orientar futuras intervenciones y políticas públicas en el ámbito local.

OBJETIVO GENERAL

Analizar la relación entre el crecimiento urbano, las condiciones de movilidad urbana y la congestión vehicular en la ciudad de Tulancingo, Hidalgo, con el fin de formular propuestas de movilidad sostenible que mejoren la eficiencia vial y promuevan un sistema urbano más seguro, equitativo y ambientalmente responsable.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1- Diagnosticar las condiciones actuales de movilidad y crecimiento urbano en Tulancingo.
- 2- Evaluar el desempeño operativo de la red vial y del transporte público e identificar puntos críticos de congestión.
- 3- Analizar alternativas de movilidad sostenible aplicables a Tulancingo con base en criterios de viabilidad técnica, operativa y urbana.
- 4- Proponer intervenciones de movilidad sostenible orientadas a reducir la congestión vehicular y fortalecer la movilidad sostenible en la ciudad.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento urbano experimentado por numerosas ciudades mexicanas en las últimas décadas ha generado importantes transformaciones en los patrones de movilidad y en el funcionamiento de los sistemas de transporte. En muchos casos, la expansión territorial y el incremento del parque vehicular han superado la capacidad de adaptación de la infraestructura vial, lo que ha provocado problemas recurrentes de congestión vehicular, aumento de los tiempos de traslado y deterioro de las condiciones ambientales urbanas (SEDATU, 2019; CONAVI, 2020).

En la ciudad de Tulancingo de Bravo, Hidalgo, estas dinámicas se han intensificado desde comienzos del siglo XXI. El crecimiento poblacional y la concentración de actividades económicas y de servicios en la cabecera municipal han incrementado significativamente la demanda de desplazamientos diarios.

Paralelamente, el parque vehicular ha mostrado un crecimiento acelerado: de acuerdo con DataMéxico (2023), el número de vehículos registrados pasó de aproximadamente 35,000 unidades en 2005 a más de 70,000 en 2020, lo que representa un aumento cercano al 100 % en quince años. Sin embargo, la infraestructura vial del municipio no ha experimentado ampliaciones ni transformaciones proporcionales, lo que ha generado saturación en varios corredores urbanos.

Entre las vialidades con mayor concentración de tránsito destacan el Boulevard Emiliano Zapata, el Boulevard Bicentenario y el Libramiento a Cuauhtémoc, que funcionan como ejes principales de conexión entre distintas zonas de la ciudad. Los aforos vehiculares registrados durante la presente investigación evidenciaron una alta demanda de tránsito en estos corredores, particularmente durante los periodos de hora pico.

En la intersección del Boulevard Emiliano Zapata con Calle 21 de Marzo se registró un volumen promedio de 6,006 vehículos por hora, lo que la consolidó como el punto con mayor carga vehicular entre los sitios analizados. Por su parte, las intersecciones del Boulevard Bicentenario con Avenida Tomás Alva Edison y del Libramiento a Cuauhtémoc con Calle Primero de Abril registraron volúmenes de 3,307 y 3,370 vehículos por hora, respectivamente. Estos valores evidencian una fuerte presión sobre la infraestructura vial existente.

El problema se evidencia en:

1. Volúmenes de tránsito en hora pico entre 3,300 y 6,000 veh/h en intersecciones críticas.
2. Relaciones volumen/capacidad (V/C) entre 0.73 y 1.33, que reflejan condiciones desde operación estable hasta saturación.
3. Demoras promedio cercanas a 80 s/veh y colas máximas de aproximadamente 120 m.
4. Una percepción ciudadana donde el 64.5 % de los encuestados considera que la congestión vehicular afecta de manera significativa o moderada su calidad de vida.

Estos indicadores muestran condiciones recurrentes de saturación operativa y de conflictividad vial, asociadas a la gestión inadecuada del espacio vial y del sistema de transporte urbano.

Además de la alta demanda vehicular, se observaron diversos factores operativos que contribuyen a la congestión. Entre ellos, destacan las maniobras frecuentes de ascenso y descenso de pasajeros del transporte público, la presencia de paradas informales, los cruces peatonales no canalizados y la falta de una gestión semafórica adecuada en algunas intersecciones estratégicas.

Estas condiciones generan fricción en el flujo vehicular, incrementan las demoras promedio en las intersecciones y provocan la formación de colas durante los periodos de mayor demanda, lo que reduce la eficiencia operativa del sistema vial.

A pesar de que instrumentos de planeación, como el Plan Integral de Movilidad Urbana Sustentable (PIMUS Tulancingo, 2018), han identificado la necesidad de mejorar la movilidad urbana en el municipio, la implementación de políticas integrales ha sido limitada.

La falta de continuidad institucional, la escasa coordinación entre los niveles de gobierno y las restricciones presupuestales han dificultado la implementación de estrategias que permitan diversificar los modos de transporte y reducir la dependencia del automóvil privado.

En este contexto, la congestión vehicular en Tulancingo se configura como un problema multidimensional asociado al crecimiento urbano, a la creciente demanda de movilidad y a la insuficiente adaptación del sistema de transporte urbano. Por ello, surge la necesidad de analizar la relación entre las dinámicas de crecimiento urbano y las condiciones operativas

de la red vial, con el propósito de identificar los factores que originan la congestión y formular propuestas de movilidad sostenible que contribuyan a mejorar la eficiencia del sistema de transporte, la seguridad vial y la calidad de vida de los habitantes.

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿En qué medida el crecimiento urbano y los patrones actuales de movilidad explican la congestión vehicular en los corredores críticos de Tulancingo?
- ¿Cuáles son los corredores e intersecciones con mayor saturación (V/C) y peor nivel de servicio (LOS) en la hora pico?
- ¿Qué componentes operativos (paradas, giros, cruces, accesos) explican la mayor proporción de la demora?
- ¿Qué patrón modal y de viaje reporta la muestra encuestada y cómo se relaciona con los puntos críticos?
- ¿Qué paquete de medidas (gestión + rediseño + seguridad peatonal/ciclista) ofrece la mayor reducción de demora y la mayor factibilidad?

HIPÓTESIS

Hipótesis general

La congestión vehicular en los principales corredores urbanos de Tulancingo se asocia a condiciones de saturación operativa y a deficiencias en la gestión del tránsito y del transporte público, que pueden mitigarse mediante intervenciones de movilidad sostenible orientadas a mejorar la operación de la red vial.

Hipótesis específicas

H1. Durante los periodos de hora pico, al menos una intersección de la red vial analizada presenta relaciones $V/C \geq 1.0$ y niveles de servicio E–F, lo que indica saturación operativa y capacidad insuficiente para absorber la demanda vehicular.

H2. La demora vehicular y la formación de colas en las intersecciones analizadas se explican principalmente por factores operativos, como paradas informales, cruces peatonales sin control y giros conflictivos, que contribuyen significativamente a la demora observada.

H3. La implementación de un conjunto de medidas de gestión del tránsito y movilidad sostenible, como la semaforización estratégica, la canalización peatonal, la redistribución de flujos y la infraestructura ciclista, puede contribuir a reducir la demora promedio respecto a la condición base sin necesidad de ampliar carriles.

METODOLOGÍA

La metodología se diseñó para responder de manera congruente a tres niveles de análisis: el territorial, que permite comprender cómo el crecimiento urbano y la concentración funcional de actividades generan patrones de viaje; el operativo, que explica cómo dichos patrones se traducen en saturación, demoras y formación de colas en corredores e intersecciones; y el propositivo, que evalúa qué combinación de medidas de gestión, rediseño vial y movilidad sostenible resulta más pertinente para una ciudad intermedia como Tulancingo (Banister, 2008; ONU-Hábitat, 2020; Transportation Research Board, 2022).

En consecuencia, el diseño metodológico no se limita a describir la congestión observada, sino que integra evidencias cuantitativas (aforos, velocidades, tiempos de recorrido, estimaciones V/C y nivel de servicio) con evidencias cualitativas y espaciales (percepción usuaria, observación de campo, análisis de infraestructura peatonal y ciclista, y revisión cartográfica y normativa).

Variables, dimensiones e indicadores de análisis

Para evitar que los objetivos, preguntas e hipótesis permanezcan en un nivel declarativo, la investigación operacionaliza cinco dimensiones centrales: estructura urbana y generación de viajes, operación de la red vial, fricción operativa en intersecciones, competitividad modal y factibilidad de la intervención.

Estas dimensiones son consistentes con la literatura reciente sobre movilidad sostenible, análisis de tránsito y ciudades intermedias, y permiten traducir conceptos amplios como congestión o movilidad sostenible en indicadores observables y comparables (Bebber et al., 2021; Giesen et al., 2025; Larrañaga et al., 2025).

Matriz de congruencia entre preguntas, objetivos, hipótesis e instrumentos

La siguiente matriz resume el encadenamiento interno del diseño metodológico y muestra cómo cada pregunta se traduce en un objetivo, una hipótesis contrastable y un conjunto específico de instrumentos.

Tabla 1. Matriz de congruencia de la investigación.

Pregunta / problema	Objetivo vinculado	Hipótesis asociada	Indicadores evidencia /
¿Qué corredores e intersecciones presentan mayor saturación?	Evaluar el desempeño operativo de la red vial.	H1: al menos una intersección presenta $V/C \geq 1.0$ y LOS E-F.	Volúmenes, V/C, LOS, colas, demoras.
¿Qué factores operativos explican la demora?	Identificar conflictos y fricción operativa.	H2: paradas informales, cruces y giros conflictivos explican la mayor parte de la demora.	Observación de campo, tiempos de recorrido, registro fotográfico.
¿Cómo se relacionan el crecimiento urbano y la movilidad?	Diagnosticar las condiciones de movilidad y de crecimiento urbanos.	Hipótesis general: la congestión se asocia con la saturación operativa y con deficiencias de gestión.	Cartografía, estructura urbana, centralidades, parque vehicular.
¿Qué medidas son más viables para reducir la congestión y mejorar la seguridad?	Analizar alternativas y formular propuestas.	H3: la gestión del tránsito y los ajustes puntuales reducen la demora sin ampliar los carriles.	Matriz de priorización, revisión normativa y factibilidad.
¿Cuál es la percepción ciudadana sobre el sistema de movilidad?	Complementar el diagnóstico técnico con evidencia social.	La calidad y la competitividad percibidas condicionan la disposición al cambio modal.	Encuesta de percepción y uso modal.
Variable / dimensión	Definición operacional	Indicadores principales	Técnicas / fuentes
Crecimiento urbano y estructura territorial	Forma de expansión, concentración de actividades y accesibilidad territorial que condicionan la generación de viajes.	Patrón de ocupación, centralidades, concentración de servicios, expansión periférica, conectividad territorial.	Cartografía, PIMUS Tulancingo, PMD, observación de campo, SIG.
Demanda y operación vial	Comportamiento del tránsito en corredores e intersecciones durante los periodos de máxima demanda.	Volumen horario, composición vehicular, velocidades de operación, tiempos de recorrido, V/C, LOS.	Aforos manuales, método del vehículo flotante, HCM 2022.
Fricción operativa	Elementos físicos y operativos que reducen la capacidad efectiva sin modificar la sección vial.	Paradas informales, giros conflictivos, accesos laterales, cruces peatonales no canalizados, mezcla modal.	Observación directa, fichas de campo, registro fotográfico.
Competitividad modal y percepción usuaria	Valoración social del transporte público, del automóvil y de la movilidad activa.	Frecuencia de uso, tiempos de espera, percepción de calidad, seguridad, disposición al cambio modal.	Encuesta estructurada a usuarios y población usuaria.
Factibilidad de intervención	Viabilidad técnica, operativa y urbana de medidas para reducir la demora y mejorar la seguridad vial.	Impacto esperado, costo relativo, compatibilidad normativa, continuidad funcional, posibilidad de ejecución gradual.	Matriz de priorización, normativa vigente, revisión técnica.

Fuente: elaboración propia.

Diseño de la investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto, con predominio del análisis cuantitativo complementado con herramientas cualitativas. Este enfoque permitió analizar de manera integral la relación entre el crecimiento urbano y la congestión vehicular en la ciudad de Tulancingo, Hidalgo, así como formular propuestas de movilidad sostenible acordes con las condiciones locales.

Desde el punto de vista metodológico, el estudio se clasifica como no experimental, de corte transversal y de alcance descriptivo-analítico. Se considera no experimental porque las variables analizadas se observaron en su contexto real, sin manipulación directa por parte del investigador. Es transversal, ya que la recolección de información se realizó en un periodo específico, mientras que su carácter descriptivo-analítico permitió caracterizar las condiciones actuales de movilidad urbana y analizar su relación con el crecimiento urbano y el funcionamiento de la red vial (Banister, 2008; ONU-Hábitat, 2020).

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la ciudad de Tulancingo de Bravo, Hidalgo, localizada en la región oriente del estado. La investigación se centró en los principales corredores urbanos donde se concentran una alta actividad económica, flujos significativos de movilidad y conflictos operativos en la circulación vehicular. Estas vialidades cumplen una función estructurante en el sistema de transporte local, al conectar distintas zonas residenciales, comerciales y de servicios.

Unidades de análisis

Las unidades de análisis consideradas en el estudio fueron tres: (i) corredores viales urbanos seleccionados por su alta carga vehicular y su función estructurante dentro de la red vial, (ii) intersecciones críticas identificadas por su convergencia de flujos y la presencia recurrente de conflictos operativos, y (iii) población usuaria del sistema de movilidad, analizada mediante una encuesta de percepción y uso modal.

Con base en estos criterios se seleccionaron tres intersecciones críticas para el levantamiento de aforos: Boulevard Emiliano Zapata con Calle 21 de Marzo, Boulevard Bicentenario con Avenida Tomás Alva Edison y Libramiento a Cuauhtémoc con Calle Primero de Abril.

Muestreo y criterios de selección

El aforo manual se estructuró en intervalos de 15 minutos para conservar la sensibilidad ante variaciones breves del flujo, especialmente en intersecciones donde la operación cambia rápidamente entre fases semafóricas, maniobras de ascenso y descenso o cruces peatonales. La desagregación temporal por cuartos de hora permite identificar el intervalo crítico, la composición del tránsito y la intensidad de la fricción operativa, y es consistente con los criterios de análisis del HCM para periodos pico y hora pico (Transportation Research Board, 2022).

La encuesta no se planteó como un instrumento inferencial para estimar parámetros poblacionales con error muestral fijo, sino como una herramienta exploratoria y explicativa para comprender la percepción de calidad, la competitividad modal, la seguridad y la disposición al cambio de comportamiento. Esta decisión es metodológicamente pertinente cuando el interés principal consiste en triangular hallazgos operativos con evidencia social y no en producir estimaciones probabilísticas de cobertura municipal (Abdullah et al., 2021a; Witchayaphong et al., 2020; Zhang et al., 2023).

La observación directa se organizó mediante fichas estandarizadas para registrar la continuidad de las banquetas, la presencia de rampas, cruces peatonales, ciclovías, accesos laterales, paradas formales e informales, la ocupación del espacio vial y las condiciones de visibilidad. Este registro es clave porque numerosos estudios muestran que la calidad percibida de la infraestructura y la seguridad subjetiva inciden en la elección modal y en la aceptación de intervenciones de rediseño vial (Nazemi et al., 2021; Fitch et al., 2022; Vasilev et al., 2022).

La selección de los puntos de observación se realizó mediante un muestreo no probabilístico por criterio técnico, considerando su relevancia en la red vial urbana. Para ello se tomaron en cuenta diversos factores, entre ellos el volumen de tránsito en horas pico, la función estratégica de ciertas vialidades como ejes de conexión intraurbana y regional, la presencia de actividades comerciales o de servicios generadoras de viajes y los antecedentes de congestión señalados en instrumentos de planeación, particularmente en el Plan Integral de Movilidad Urbana Sustentable (PIMUS Tulancingo, 2018).

Con base en estos criterios se seleccionaron tres puntos representativos para el análisis operativo: la intersección Boulevard Emiliano Zapata – Calle 21 de Marzo, la intersección Boulevard Bicentenario – Avenida Tomás Alva Edison y la intersección Libramiento a Cuauhtepéc – Calle Primero de Abril.

Estos nodos concentran flujos urbanos y regionales, presentan conflictos operativos recurrentes y permiten evaluar, en una misma ciudad intermedia, escenarios de sobresaturación, operación exigente y fricción por accesos laterales, transporte público y movimientos peatonales (PIMUS Tulancingo, 2018; Gobierno Municipal de Tulancingo, 2020).

Técnicas e instrumentos de recolección de información

Para el desarrollo de la investigación se emplearon diversas técnicas de levantamiento de información. Una de las principales fue el aforo vehicular manual, mediante el cual se contabilizó el volumen de tránsito en intersecciones estratégicas durante los periodos de mayor demanda. Los conteos se realizaron durante un día hábil representativo en horarios de 7:00 a 9:00 horas y de 16:00 a 18:00 horas, intervalos que corresponden a los momentos de mayor movilidad en la ciudad. Durante el registro, se clasificaron los vehículos en diferentes categorías, incluidos automóviles particulares, transporte público, motocicletas, vehículos de carga y bicicletas.

De manera complementaria se aplicó una encuesta semiestructurada dirigida a personas usuarias y habitantes del municipio, con el objetivo de conocer su percepción sobre la calidad del transporte público, las condiciones de movilidad, los tiempos de espera, la seguridad vial y el impacto de la congestión vehicular en sus desplazamientos cotidianos. La muestra se definió mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, aplicado a personas encuestadas en puntos de alta afluencia del municipio, con el fin de obtener evidencia perceptual complementaria al diagnóstico técnico.

Para el análisis operativo, los volúmenes observados se contrastaron con las capacidades de referencia y el contexto geométrico y funcional de cada intersección. Se privilegió una lectura técnica prudente: los valores de V/C, LOS, demora y cola se interpretan como aproximaciones robustas para el diagnóstico urbano, pero siempre acompañadas de la

observación de campo y de la lectura contextual, evitando tratarlos como cifras aisladas o autosuficientes (Transportation Research Board, 2022; Carboni & Coskun, 2025).

La integración de los resultados no se realizó de forma lineal, sino mediante triangulación analítica. Los hallazgos de aforos y tiempos de recorrido se contrastaron con la percepción ciudadana sobre la calidad del transporte público, la seguridad peatonal y la factibilidad de reducir el uso del automóvil y, a su vez, ambos bloques se interpretaron a la luz de la estructura urbana y de la distribución territorial de equipamientos y centralidades. Esta triangulación fortalece la validez interna del diagnóstico y evita soluciones basadas exclusivamente en ampliar la capacidad vial (Banister, 2008; Abdullah et al., 2022; Giesen et al., 2025).

La priorización de propuestas siguió un criterio multicriterio de impacto–factibilidad. Se valoró el potencial de cada intervención para reducir la demora, ordenar los conflictos, mejorar la seguridad vial, fortalecer los modos de transporte sostenibles y mantenerse dentro de la capacidad institucional del municipio. Este enfoque es consistente con la literatura reciente, que advierte que la infraestructura por sí sola no resuelve la congestión si no se acompaña de la gestión del tránsito, la integración modal y la gobernanza local (Anupriya et al., 2023; Hansel, 2025; Papadakis et al., 2024).

El trabajo de campo también incluyó recorridos de observación directa en vialidades primarias y secundarias para evaluar las condiciones de la infraestructura peatonal y ciclista. Durante estos recorridos se registraron aspectos como el estado de las banquetas, la existencia de cruces peatonales, semáforos y rampas de accesibilidad, así como la presencia o ausencia de ciclovías. Las observaciones fueron documentadas mediante fichas de campo y registros fotográficos. Además del control operativo de los registros, la investigación incorpora criterios explícitos de validez y confiabilidad.

La validez de contenido se apoya en la correspondencia entre preguntas, variables e instrumentos, así como en la normativa técnica; la validez interna se refuerza mediante la triangulación de aforos, observación de campo, encuesta y análisis espacial; y la confiabilidad se atiende mediante formatos homogéneos de captura, revisión cruzada de conteos y depuración de inconsistencias antes del cálculo de indicadores (Transportation Research Board, 2022; Bebbber et al., 2021).

Desde el punto de vista ético, la encuesta se aplicó sin recopilar datos personales sensibles y con carácter estrictamente académico. Se privilegió el anonimato, la participación voluntaria y el uso agregado de la información, mientras que el material fotográfico y cartográfico se empleó únicamente con fines de diagnóstico territorial y de análisis técnico. Esto es especialmente importante en estudios urbanos que implican la interacción directa con los usuarios y la observación del espacio público.

Adicionalmente, se recopiló información secundaria proveniente de fuentes estadísticas y documentos oficiales, entre ellos el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020), la plataforma DataMéxico (2023) y el Plan Integral de Movilidad Urbana Sustentable de Tulancingo. Estos datos permitieron analizar la evolución del crecimiento urbano y del parque vehicular en el municipio.

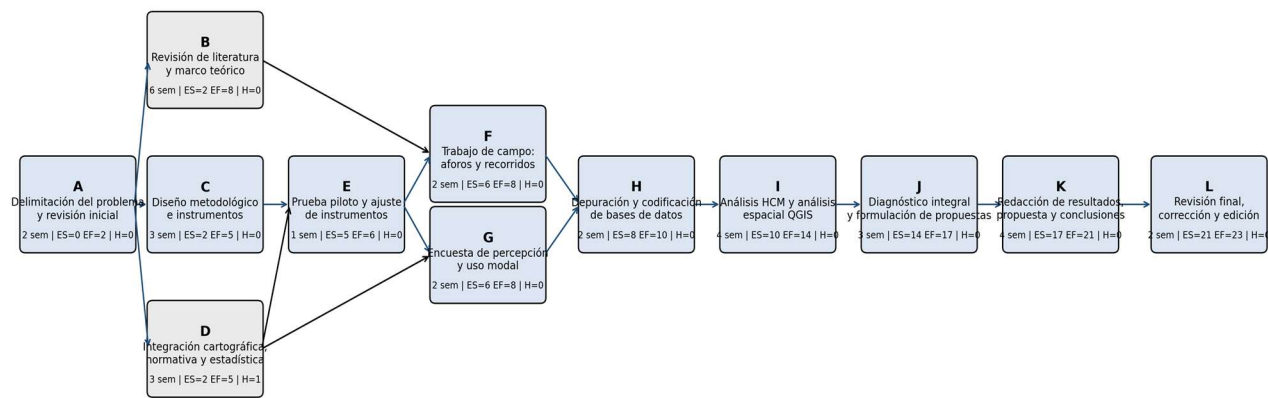
Procesamiento y análisis de la información

La información recopilada durante el trabajo de campo se organizó en una base de datos digital elaborada en hojas de cálculo. Posteriormente se aplicaron análisis estadísticos descriptivos para caracterizar la situación de la movilidad urbana y comparar los niveles de congestión en los distintos puntos de observación.

En el caso de los aforos vehiculares se calcularon los volúmenes horarios de tránsito y la composición del flujo vehicular por tipo de unidad. Aunque metodológicamente se consideró la posibilidad de expresar los volúmenes en unidades equivalentes de automóvil de pasajeros (PCU), en el análisis final los resultados se presentan en vehículos por hora (veh/h) para mantener la consistencia en su interpretación.

Ruta crítica, secuencia operativa y programación del estudio

La planeación temporal de la tesis se estructuró mediante una red de precedencias tipo CPM, con el propósito de distinguir entre actividades críticas, holguras y dependencias reales en las fases de formulación, levantamiento de información, procesamiento, análisis y redacción. A diferencia de un cronograma lineal, esta herramienta permite identificar qué actividades pueden desarrollarse en paralelo y cuáles retrasarían la investigación completa si se posponen (Transportation Research Board, 2022).



Ruta crítica principal: A-C-E-F/G-H-I-J-K-L | Duración total estimada: 23 semanas

Figura metodológica 1. Red de precedencias (CPM) del desarrollo de la tesis.

Fuente: elaboración propia.

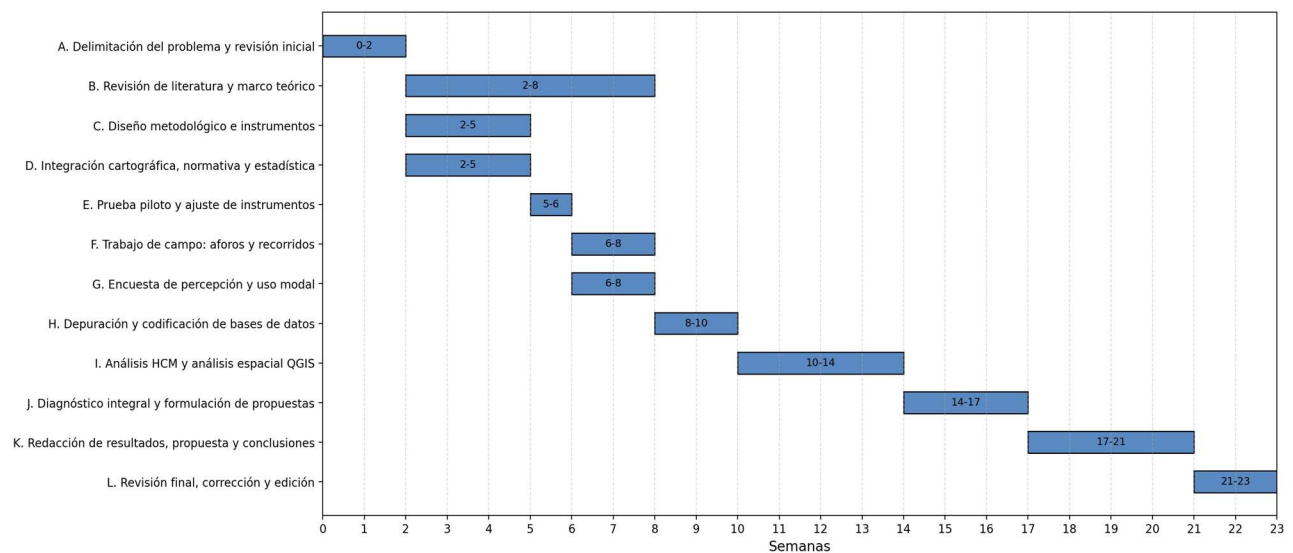


Figura metodológica 2. Cronograma derivado de la ruta crítica (CPM).

Fuente: elaboración propia.

La red muestra que la duración total estimada del proceso es de veintitrés semanas y que la ruta crítica principal se articula a partir de las actividades A–C–E–F/G–H–I–J–K–L, mientras que la integración cartográfica y normativa posee una holgura operativa controlada.

Esta formulación resulta más consistente que una secuencia puramente lineal, porque reconoce que la revisión de la literatura, la integración cartográfica y la preparación de

instrumentos pueden avanzar de manera parcialmente paralela sin comprometer la coherencia del estudio.

Tabla 2. Cronograma de Actividades

Actividad	ES	EF	LS	LF	Holgura
A	0	2	0	2	0
B	2	8	2	8	0
C	2	5	2	5	0
D	2	5	3	6	1
E	5	6	5	6	0
F	6	8	6	8	0
G	6	8	6	8	0
H	8	10	8	10	0
I	10	14	10	14	0
J	14	17	14	17	0
K	17	21	17	21	0
L	21	23	21	23	0
Clave	Actividad		Predecesora		Duración (semanas)
A	Delimitación del problema y revisión inicial		—		2
B	Revisión de literatura y construcción del marco teórico		A		6
C	Diseño metodológico e instrumentos		A		3
D	Integración cartográfica, normativa y estadística		A		3
E	Prueba piloto y ajuste de instrumentos		C y D		1
F	Trabajo de campo: aforos y recorridos		E y B		2
G	Encuesta de percepción y uso modal		E y D		2
H	Depuración y codificación de bases de datos		F y G		2
I	Análisis HCM y análisis espacial QGIS		H		4
J	Diagnóstico integral y formulación de propuestas		I		3
K	Redacción de resultados, propuesta y conclusiones		J		4
L	Revisión final, corrección y edición		K		2

Fuente: elaboración propia.

Paralelamente, la información estadística se integró con análisis espacial mediante Sistemas de Información Geográfica (QGIS). Esto permitió elaborar mapas temáticos para visualizar la relación entre la expansión urbana, la localización de las actividades y los patrones de congestión vehicular en la ciudad.

Control de calidad de la información

Para garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos, se implementaron diversas medidas de control durante el levantamiento y el procesamiento de la información. Entre ellas se incluyeron la verificación cruzada de los conteos durante los aforos, la revisión de la consistencia de los registros por intervalos de tiempo y la depuración de la base de datos antes de realizar los análisis estadísticos. Asimismo, las observaciones de campo se contrastaron con los resultados tabulados para detectar posibles inconsistencias. Estas medidas permitieron reducir los errores de registro y mejorar la validez de los resultados obtenidos.

Síntesis del diseño metodológico

En síntesis, el estudio se desarrolló bajo un diseño no experimental, de corte transversal y de alcance descriptivo-analítico. Las unidades de análisis estuvieron constituidas por tres componentes principales: (i) corredores viales urbanos seleccionados por su carga vehicular y la presencia de conflictos operativos, (ii) intersecciones críticas identificadas por la convergencia de flujos y por condiciones recurrentes de congestión, y (iii) población usuaria del sistema de movilidad, analizada mediante encuestas de percepción y uso modal.

La selección de los puntos de estudio se realizó mediante muestreo intencional, considerando criterios técnicos como la recurrencia de congestión reportada en diagnósticos previos, la conectividad dentro de la red vial urbana, la presencia de paradas y de maniobras de ascenso y descenso del transporte público, así como la existencia de conflictos entre peatones y vehículos.

Para la recolección de información se emplearon distintos instrumentos, entre ellos formatos de aforo vehicular clasificados en intervalos de 15 minutos, registros de tiempos de recorrido mediante el método del vehículo flotante y un cuestionario estructurado de percepción y uso modal aplicado a la muestra encuestada en Tulancingo, Hidalgo.

El procesamiento de la información incluyó la organización de los datos en bases digitales y la aplicación de procedimientos de análisis propios de la ingeniería de transporte. En particular, se estimaron indicadores operativos como la relación volumen/capacidad (V/C), el nivel de servicio (LOS) y las demoras en intersecciones, conforme a los procedimientos establecidos en el Highway Capacity Manual (Transportation Research Board, 2022). Para mantener consistencia interpretativa, los resultados se presentan en vehículos por hora (veh/h).

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO I

Estructura analítica del marco teórico y del estado actual del conocimiento

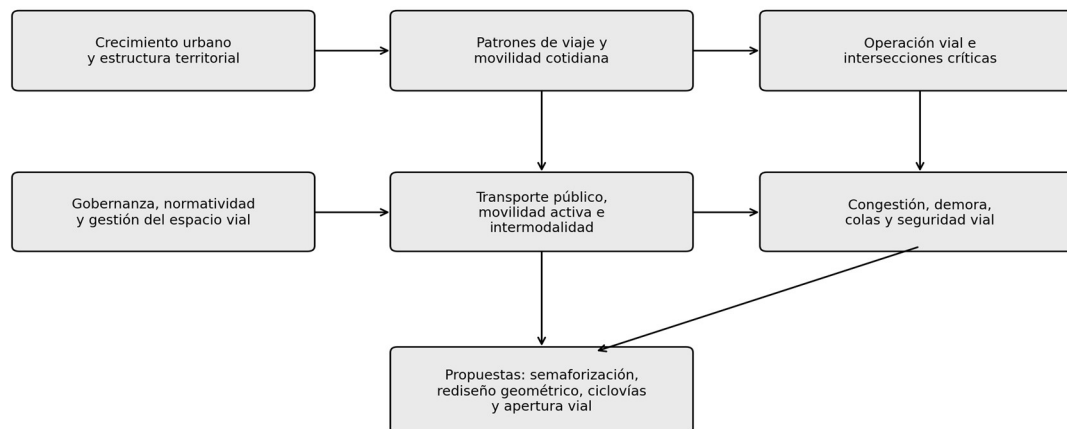
El marco teórico de esta tesis se organiza en tres planos complementarios. El primero reúne las bases teóricas y conceptuales de la movilidad sostenible, el rediseño vial y la congestión urbana; el segundo traduce esos conceptos a un plano técnico-operativo propio de la ingeniería vial, donde se analizan la capacidad, el nivel de servicio, las intersecciones y la gestión del tránsito; y el tercero funciona como marco contextual, al describir la estructura territorial, urbana y vial de Tulancingo. Esta organización evita confundir las definiciones conceptuales con los fundamentos técnicos y, al mismo tiempo, permite vincular la teoría general con el caso de estudio.

La literatura reciente coincide en que la congestión urbana no puede explicarse únicamente por la cantidad de vehículos en circulación. La evidencia muestra que la forma urbana, la localización de actividades, la calidad del transporte público, la seguridad percibida de la movilidad activa, la gobernanza del espacio vial y la gestión de intersecciones actúan de manera simultánea sobre el patrón de viajes y sobre la eficiencia del sistema (Bibri et al., 2020; Giesen et al., 2025; Larrañaga et al., 2025; Papadakis et al., 2024).

Por ello, el estado actual del conocimiento se presenta aquí de forma comparativa y no como una mera acumulación de antecedentes. Se identifican convergencias, tensiones y vacíos: algunas investigaciones priorizan la redistribución del espacio vial; otras subrayan la seguridad y la percepción usuaria; otras, finalmente, sostienen que, sin integración institucional y sin competitividad del transporte público, las mejoras puntuales tienen efectos limitados. La tesis retoma estas discusiones para construir un diagnóstico integral de una ciudad intermedia mexicana, un terreno todavía menos estudiado que el de las grandes metrópolis (Arellana et al., 2020; Attard et al., 2023; Hansel, 2025).

La comparación permite sostener que el vacío que atiende esta tesis no radica en la inexistencia de estudios sobre congestión, movilidad activa o transporte público, sino en la falta de investigaciones integradas que, para una ciudad intermedia mexicana, relacionen la estructura urbana, la operación vial, la percepción social y la priorización técnica de soluciones de bajo y mediano costo.

Ese vacío justifica que el diagnóstico de Tulancingo combine HCM, observación de fricción operativa, encuesta de percepción y propuestas de movilidad sostenible con criterio de factibilidad local (Arellana et al., 2020; Giesen et al., 2025; Hansel, 2025).



El modelo articula estructura urbana, operación vial, accesibilidad, gobernanza y propuestas de movilidad sostenible.

Figura teórica 3. Modelo analítico integrador de la investigación.

Fuente: elaboración propia.

La literatura contemporánea sobre transporte público insiste en que su papel estructurante depende menos de la mera existencia de rutas y más de su confiabilidad, legibilidad, cobertura y articulación con otros modos de transporte. Giesen et al. (2025) subrayan que, en América Latina y el Caribe, el reto principal no es solo ampliar la oferta, sino revertir la pérdida de competitividad frente a modos individuales motorizados. Witchayaphong et al. (2020), Zhang et al. (2023) y Abdullah et al. (2021a, 2021b, 2022) coinciden en que la frecuencia, el tiempo de espera, la accesibilidad, el costo y la percepción de confort inciden decisivamente en la elección modal.

La investigación sobre la movilidad como servicio y los planes de movilidad sostenible amplían esta discusión. Ali et al. (2025) muestran que las decisiones modales se transforman cuando los usuarios perciben integración, conveniencia y facilidad de transferencia; mientras que van der Craats et al. (2025) advierten que la inclusión social debe estar en el centro de cualquier SUMP, especialmente cuando intervienen servicios compartidos o soluciones de última milla. Esta perspectiva es relevante para Tulancingo, donde la fragmentación

operativa del transporte colectivo reduce su capacidad para constituirse como una alternativa real al automóvil.

En términos críticos, la literatura converge en que el transporte público debe ser el eje de la movilidad sostenible, pero diverge respecto de la escala óptima de intervención: algunas ciudades requieren corredores de alta capacidad; otras, mejoras operativas, control de paradas y coordinación. Dado el tamaño y la estructura de Tulancingo, la tesis asume que la prioridad radica en mejorar la operación, la competitividad y la articulación, más que en replicar mecánicamente modelos metropolitanos de gran escala.

Tabla 3. Ejes comparativos

Eje comparativo	Investigaciones representativas	Convergencias	Vacío relevante para la tesis
Forma urbana, accesibilidad y ciudades intermedias	Bibri et al. (2020); Arellana et al. (2020, 2021); Attard et al. (2023); Larrañaga et al. (2025)	La estructura urbana, la localización de las actividades y la equidad de accesibilidad condicionan la movilidad cotidiana.	Faltan estudios integrados que vinculen el crecimiento urbano, la operación vial y propuestas factibles en ciudades intermedias mexicanas.
Transporte público, elección modal y competitividad	Abdullah et al. (2021a, 2021b, 2022); Witchayaphong et al. (2020); Zhang et al. (2023); Giesen et al. (2025)	La confiabilidad, el tiempo de espera, el costo generalizado y la percepción de calidad explican gran parte del cambio modal.	Escasean diagnósticos locales que articulen evidencia técnica sobre la congestión con evidencia social sobre la calidad del transporte público.
Movilidad activa e infraestructura ciclista	Nazemi et al. (2021). Fitch et al. (2022). Gössling & McRae (2022); Friel et al. (2023); Garber et al. (2023)	La seguridad objetiva y subjetiva depende de la continuidad, la separación, el tratamiento en las intersecciones y la visibilidad.	Pocas investigaciones demuestran cómo estas variables pueden transferirse a ciudades intermedias con recursos limitados y redes discontinuas.
Calles completas, rediseño vial y humanización	Bian et al. (2023). Maisel et al. (2021); Vasilev et al. (2022, 2023); Mockus & Jasiūnienė (2024)	Redistribuir el espacio vial puede mejorar la seguridad y la percepción urbana sin ampliar las calzadas.	Se requiere evidencia aplicada que combine seguridad, operación y compatibilidad institucional en contextos urbanos locales.
Gestión del tránsito, ITS y mitigación de congestión	Anupriya et al. (2023); Carboni & Coskun (2025); Papadakis et al. (2024)	Las soluciones de gestión pueden ser más eficientes que ampliar la capacidad, pero dependen de los datos y de la coordinación operativa.	Hacen falta aplicaciones adaptadas a municipios que no cuentan con centros avanzados de control, pero sí con nodos críticos identificables.

Gobernanza, intermodalidad y sostenibilidad	McQueen et al. (2021); Hansel (2025); van der Craats et al. (2025); Bebber et al. (2021)	La sostenibilidad requiere la integración modal, la gestión del estacionamiento, la inclusión social y la continuidad de la política pública.	Persiste un vacío entre agendas normativas ambiciosas y la implementación concreta en ciudades medias con capacidades limitadas.
---	--	---	--

fuentes: elaboración propia

1. Fundamentos teóricos de la movilidad urbana integral y la gestión del sistema vial

1.1 Movilidad urbana integral

La movilidad urbana integral constituye uno de los principales enfoques contemporáneos para la planificación del transporte en las ciudades. Este concepto se refiere a la capacidad de un sistema de transporte urbano para satisfacer las necesidades de desplazamiento de las personas y de las mercancías de manera eficiente, segura y accesible, sin comprometer los recursos ambientales, económicos y sociales de las generaciones futuras (Banister, 2008). En este sentido, la movilidad sostenible busca equilibrar la eficiencia operativa del sistema vial con la accesibilidad urbana, la equidad social y la protección del medio ambiente.

De acuerdo con Banister (2008), la movilidad integral implica un cambio de paradigma en la comprensión del transporte urbano. En lugar de priorizar la circulación vehicular como objetivo principal, se plantea que el transporte debe concebirse como un medio para facilitar el desarrollo urbano, social y económico. Bajo esta perspectiva, se promueve la reducción progresiva de la dependencia del automóvil particular mediante el fortalecimiento de los modos de transporte más eficientes y sostenibles, como el transporte público, la bicicleta y la caminata.

Diversos organismos internacionales han señalado que el tránsito hacia sistemas de movilidad más sostenibles requiere una combinación de políticas urbanas y de transporte. Entre las estrategias más relevantes se encuentran la densificación urbana, la mejora de la calidad y la cobertura del transporte público, la promoción de la movilidad activa y el rediseño del espacio vial para priorizar a los usuarios más vulnerables (SEDATU, 2019b). Estas acciones contribuyen a disminuir la congestión vehicular, a reducir las emisiones contaminantes y a mejorar la calidad de vida en las ciudades.

La aplicación de estos principios resulta particularmente relevante en ciudades intermedias, donde las distancias de desplazamiento suelen ser relativamente cortas y las intervenciones urbanas pueden implementarse con mayor facilidad que en grandes áreas metropolitanas. En estos contextos, el fortalecimiento de la movilidad activa y del transporte público puede generar beneficios significativos en términos de accesibilidad, eficiencia energética y sostenibilidad urbana.

La literatura más reciente coincide en que la movilidad sostenible no debe reducirse al reemplazo modal del automóvil por otros medios, sino que supone una reconfiguración conjunta de accesibilidad, proximidad, equidad y forma urbana. Bibri et al. (2020) destacan que los enfoques de ciudad compacta solo producen beneficios cuando se acompañan de accesibilidad efectiva; Banister (2008) había advertido que el centro del paradigma sostenible es la proximidad y no la velocidad; y Papadakis et al. (2024) subrayan que los mejores resultados se obtienen cuando las estrategias de movilidad activa, transporte público y desincentivo del automóvil se implementan de manera coordinada.

Desde una perspectiva funcional, el crecimiento urbano no solo implica la expansión física de la mancha urbana, sino también la transformación de los patrones de accesibilidad y movilidad. A medida que la ciudad se expande, las distancias entre los puntos de origen y destino tienden a incrementarse, lo que genera una mayor dependencia de los modos de transporte motorizados, particularmente del automóvil particular. Este fenómeno se relaciona directamente con la disminución de la densidad urbana y la fragmentación del territorio, factores que dificultan la provisión eficiente de transporte público y servicios urbanos.

Asimismo, el crecimiento urbano desarticulado tiende a generar redes viales discontinuas, con escasa conectividad transversal y alta concentración de flujos en pocos corredores principales. Esta configuración incrementa la vulnerabilidad del sistema vial ante incrementos en la demanda, provocando saturación en intersecciones clave y reduciendo la resiliencia del sistema de movilidad urbana.

En este sentido, la movilidad urbana sostenible no se limita a la incorporación de modos alternativos de transporte, sino que implica una reconfiguración integral del sistema de movilidad, orientada a reducir la necesidad de desplazamientos motorizados y a optimizar la distribución modal de los viajes. Este enfoque promueve la proximidad urbana, la mezcla de

usos de suelo y la jerarquización de la red vial, priorizando los desplazamientos peatonales, ciclistas y de transporte público.

Además, la movilidad sostenible incorpora el concepto de eficiencia sistémica, donde el objetivo no es únicamente incrementar la capacidad de la infraestructura, sino mejorar el desempeño global del sistema mediante la gestión de la demanda, la optimización de la operación vial y la integración de tecnologías inteligentes de transporte. De esta manera, se busca equilibrar la relación entre oferta y demanda de movilidad sin recurrir exclusivamente a la expansión física de la red vial.

1.2 Rediseño vial integral

El rediseño vial sostenible es una estrategia de ingeniería urbana orientada a mejorar el funcionamiento del sistema de transporte mediante la reorganización del espacio vial existente. A diferencia del enfoque tradicional de planeación del transporte, que buscaba resolver la congestión principalmente mediante la ampliación de calles y avenidas, el rediseño sostenible propone optimizar el uso del espacio público y distribuirlo de manera más equitativa entre los distintos modos de transporte.

Este enfoque se relaciona con el concepto internacional conocido como Complete Streets, que plantea que las calles deben diseñarse para ser seguras, accesibles y funcionales para todos los usuarios, independientemente de su edad, capacidad física o medio de transporte (Smart Growth America, 2020). En este tipo de diseño se incorporan elementos como aceras amplias, cruces peatonales señalizados, ciclovías protegidas, paradas de transporte público seguras, iluminación adecuada y vegetación urbana.

Desde la perspectiva de la ingeniería vial, el rediseño sostenible implica analizar la jerarquía funcional de la red urbana y asignar prioridades de circulación según las características de cada vía. Las calles con alta densidad peatonal o con presencia significativa de transporte público suelen requerir intervenciones orientadas a mejorar la seguridad vial y la accesibilidad, mientras que las vías de mayor capacidad pueden concentrar el tránsito motorizado.

La evidencia empírica sobre calles completas y el rediseño vial muestra que la reorganización del espacio existente puede generar mejoras en la seguridad, la legibilidad urbana y la calidad del entorno sin depender exclusivamente de ampliaciones de calzada. Bian et al. (2023) documentan que la evaluación de proyectos de "*complete streets*" requiere combinar fuentes tradicionales y datos emergentes; Maisel et al. (2021) muestran que los usuarios perciben mejoras significativas cuando los corredores incorporan elementos de diseño orientados a todos los modos; y Vasilev et al. (2022, 2023) reportan que las intervenciones temporales o intermedias modifican favorablemente la percepción de distintos usuarios, aunque sus efectos dependen del contexto.

Estas intervenciones no necesariamente requieren grandes inversiones en infraestructura. En muchos casos, la reorganización del espacio vial mediante señalización, redistribución de carriles o la implementación de infraestructura ligera puede mejorar significativamente la seguridad vial y la eficiencia operativa de las calles.

1.3 Ciclovías como infraestructura integral

Las ciclovías constituyen una de las intervenciones más relevantes para fomentar la movilidad no motorizada y reducir la dependencia del automóvil en los desplazamientos urbanos. Se trata de corredores exclusivos o compartidos destinados al tránsito seguro de bicicletas, cuyo diseño debe garantizar condiciones adecuadas de continuidad, conectividad y seguridad para los usuarios (Pucher & Buehler, 2012).

Desde el punto de vista operativo, las ciclovías contribuyen a la reducción de la congestión vehicular al desplazar viajes de corta y mediana distancia hacia modos no motorizados, liberando capacidad en la red vial. Diversos estudios han demostrado que una proporción significativa de los viajes urbanos en ciudades intermedias es menor a 5 kilómetros, distancia óptima para el uso de la bicicleta.

Asimismo, la implementación de infraestructura ciclista continua y segura influye directamente en la percepción de seguridad de los usuarios, factor determinante para el incremento en el uso de la bicicleta. La discontinuidad en la infraestructura, las intersecciones inseguras y la falta de señalización adecuada constituyen las principales

barreras para la adopción de este modo de transporte, por lo que su diseño debe contemplar no solo la sección de la ciclovía, sino su integración con el sistema vial en su conjunto.

Desde el punto de vista técnico, el diseño de ciclovías debe considerar diversos elementos geométricos y operativos. Entre ellos se incluyen anchos mínimos de circulación, radios de curvatura adecuados para evitar maniobras bruscas, pendientes longitudinales moderadas y superficies pavimentadas que garanticen la estabilidad y la seguridad. De acuerdo con los lineamientos de diseño urbano promovidos por SEDATU (2019a), las ciclovías deben contar, además, con señalización horizontal y vertical específica, iluminación adecuada y, cuando sea posible, separación física respecto al tránsito vehicular.

La efectividad de esta infraestructura ha sido ampliamente documentada en diversas ciudades del mundo. En Bogotá, por ejemplo, la red de ciclovías supera los 550 kilómetros y ha contribuido significativamente al incremento del uso de la bicicleta como medio de transporte cotidiano, pasando de niveles marginales en la década de 1990 a porcentajes superiores al 6 % de los viajes urbanos en la actualidad (ONU-Hábitat, 2020). Experiencias similares se han desarrollado en ciudades latinoamericanas como León y Puebla, donde las ciclovías se han integrado con los sistemas de transporte público, lo que ha favorecido la intermodalidad.

Las investigaciones recientes sobre infraestructura ciclista muestran con notable consistencia que la seguridad percibida y la seguridad operativa mejoran cuando existe continuidad de la red, separación física respecto al tránsito motorizado y tratamiento específico en intersecciones. Nazemi et al. (2021), Fitch et al. (2022), Gössling & McRae (2022) y Huemer et al. (2022) coinciden en que los usuarios ocasionales o prospectivos son particularmente sensibles a la separación y a la legibilidad geométrica del espacio ciclista. Guo et al. (2023), mediante entornos inmersivos, refuerzan esta idea al mostrar que los carriles protegidos elevan de forma perceptible la sensación de seguridad.

En ciudades intermedias, la implementación de ciclovías puede resultar especialmente efectiva debido a las distancias relativamente cortas entre las zonas residenciales, comerciales y de servicios. En estos contextos, el uso de la bicicleta puede convertirse en una alternativa viable para los viajes cotidianos, contribuyendo a reducir la congestión vehicular y las emisiones contaminantes.



Ilustración 1. Infraestructura ciclista existente en Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).

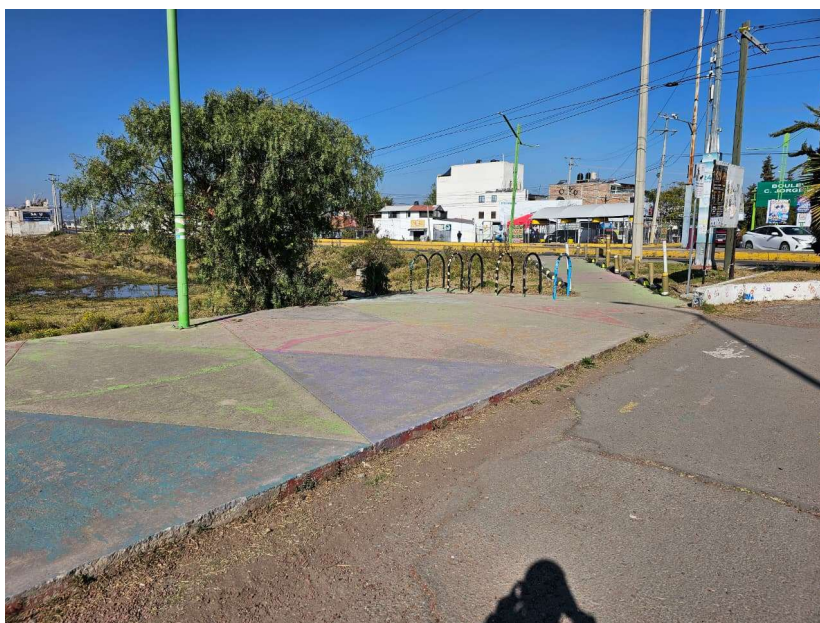


Ilustración 2. Infraestructura ciclista en el Boulevard Emiliano Zapata, Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).



Ilustración 3. Condiciones de la ciclovía en Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).



Ilustración 4. Segmento de ciclovía urbana en Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).

1.4 Andadores peatonales y movilidad activa

La movilidad peatonal constituye el componente más básico y universal del sistema de transporte urbano, ya que todos los desplazamientos, independientemente del modo utilizado, inician y concluyen con un tramo peatonal. Por ello, la calidad de la infraestructura peatonal influye directamente en la eficiencia global del sistema de movilidad.

En este sentido, la incorporación de andadores peatonales, banquetas continuas y cruces seguros no solo mejora la accesibilidad, sino que también contribuye a la reducción de conflictos entre usuarios y a la disminución de accidentes viales. La adecuada gestión del espacio peatonal permite ordenar los flujos y reducir interrupciones al tránsito vehicular, especialmente en zonas de alta actividad comercial, donde los cruces desordenados suelen generar congestión recurrente.

La caminabilidad y la calidad de la infraestructura peatonal son hoy un componente central de la movilidad sostenible, no un complemento marginal. Arellana et al. (2020) demuestran que la percepción del entorno construido, continuidad, confort, seguridad y conectividad altera la experiencia peatonal y la disposición al desplazamiento a pie; y Arellana et al. (2021) muestran que la accesibilidad peatonal es, además, una cuestión de equidad urbana. Attard et al. (2023) llevan esta discusión al plano distributivo al argumentar que la asignación del espacio viario suele favorecer desproporcionadamente al automóvil.

De acuerdo con el Manual de Calles: Diseño vial para ciudades mexicanas y con los principios de la Ley General de Movilidad y Seguridad Vial, las infraestructuras peatonales deben cumplir con criterios de accesibilidad universal que garanticen condiciones seguras para todos los usuarios. Entre estos criterios se incluyen anchos libres suficientes para la circulación peatonal, superficies continuas y antideslizantes, pendientes moderadas, así como la incorporación de rampas y elementos que faciliten el desplazamiento de personas con movilidad reducida.

Los beneficios de la infraestructura peatonal se manifiestan tanto en el ámbito social como en el ambiental. Desde una perspectiva urbana, los espacios peatonales bien diseñados favorecen la interacción social, mejoran la percepción de seguridad y promueven el uso del

espacio público. Desde el punto de vista ambiental, la movilidad peatonal reduce la necesidad de desplazamientos motorizados en distancias cortas y contribuye a disminuir las emisiones contaminantes.

Experiencias nacionales, como la peatonalización parcial del centro histórico de Guadalajara, han demostrado que este tipo de intervenciones puede mejorar la calidad del espacio urbano, reducir la congestión en las zonas comerciales y fortalecer la actividad económica local (Maisel et al., 2021; Vasilev et al., 2023).

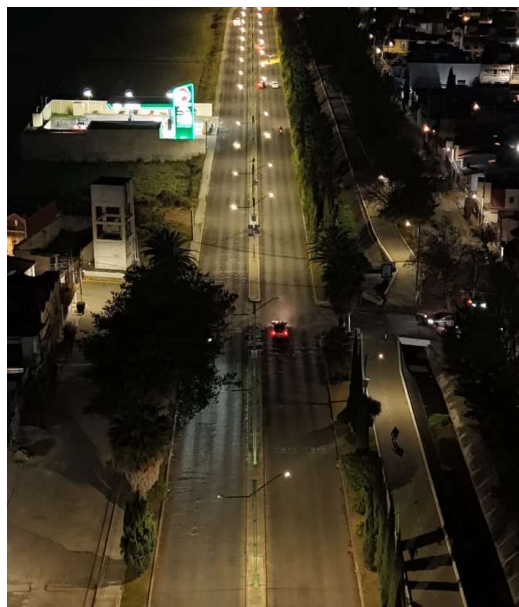


Ilustración 5. Condiciones del Boulevard Bicentenario, Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025)



Ilustración 6. Infraestructura ciclista en la zona urbana de Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).



Ilustración 7. Condiciones de movilidad ciclista en Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025)

1.5 Corredores de transporte público

El transporte público constituye el elemento estructurador de los sistemas de movilidad urbana sostenible. Los corredores de transporte público concentran el tránsito de autobuses o unidades de alta capacidad en los ejes principales de la ciudad, lo que permite ofrecer un servicio más rápido, confiable y competitivo frente al automóvil particular.

El fortalecimiento del transporte público en corredores estratégicos permite incrementar la eficiencia del sistema de movilidad al movilizar un mayor número de personas en menor espacio vial. En términos de capacidad, un carril destinado al transporte público puede transportar significativamente más pasajeros que un carril destinado al automóvil particular, lo que lo convierte en un elemento clave para la reducción de la congestión.

Además, la implementación de corredores estructurados de transporte público facilita la integración modal, permitiendo la conexión con sistemas de movilidad activa como ciclovías y andadores peatonales. Esta integración contribuye a la construcción de sistemas de

transporte más accesibles, equitativos y eficientes, reduciendo la dependencia del automóvil y mejorando la calidad del servicio urbano.

Uno de los modelos más conocidos es el sistema Bus Rapid Transit (BRT), que se caracteriza por la implementación de carriles exclusivos para autobuses, estaciones definidas, sistemas de pago previo y gestión operativa centralizada. Estas características permiten reducir los tiempos de viaje, mejorar la regularidad del servicio y aumentar la capacidad de transporte de pasajeros (Giesen et al., 2025; Papadakis et al., 2024).

El sistema TransMilenio en Bogotá constituye uno de los ejemplos más representativos de esta modalidad, ya que ha logrado reducir significativamente los tiempos de traslado y mejorar la eficiencia del transporte público en la ciudad. En México, ciudades como Ciudad de México y Guadalajara han implementado sistemas similares, con resultados positivos en materia de movilidad urbana.

En ciudades intermedias, la implementación de corredores preferenciales para el transporte público puede desarrollarse mediante intervenciones de menor escala, como carriles preferenciales, la reorganización de paradas o mejoras en la gestión del tránsito, sin requerir necesariamente infraestructura pesada.



Ilustración 8. Corredor de transporte público Tuzobús en el estado de Hidalgo.

Fuente: fotografía de Mayra Silvia Navarrete Aldana.

1.6 Gestión del tráfico y sistemas inteligentes de transporte

La gestión del tráfico es una herramienta fundamental para mejorar el funcionamiento de la red vial sin recurrir a la expansión física de las calles. Este enfoque se basa en la aplicación de Sistemas Inteligentes de Transporte (Intelligent Transport Systems, ITS), que emplean tecnologías de la información y la comunicación para optimizar la operación del tránsito vehicular (Transportation Research Board, 2022; Carboni & Coskun, 2025).

La gestión del tráfico y los sistemas inteligentes de transporte han pasado de entenderse como herramientas exclusivamente tecnológicas a concebirse como instrumentos de administración dinámica del espacio vial y de los conflictos operativos. Papadakis et al. (2024) documentan que las mejores prácticas de movilidad sostenible integran la gestión de señales, la información al usuario y la priorización modal; Carboni & Coskun (2025) señalan que la evaluación de las estrategias de gestión debe considerar tanto el desempeño operacional como los efectos ambientales; y Anupriya et al. (2023) advierten que ampliar la capacidad vial rara vez resuelve de manera estructural la congestión.

En este marco, la semaforización coordinada, la regulación de paradas, la gestión de giros y la reorganización de accesos laterales pueden producir beneficios relevantes cuando los principales problemas se originan en nodos y corredores específicos. La literatura coincide en que las medidas de gestión suelen ser más costo-efectivas que las expansiones físicas cuando el sistema opera con fricción, con mezcla modal y con conflictos puntuales, más que con insuficiencia geométrica absoluta (Transportation Research Board, 2022; Papadakis et al., 2024; Carboni & Coskun, 2025).

No obstante, la confrontación entre investigaciones evidencia un límite importante: la gestión del tráfico mejora la operación, pero no sustituye una política de movilidad sostenible. Su eficacia depende de que esté articulada con la seguridad peatonal, el transporte público competitivo, la infraestructura ciclista y los criterios de redistribución del espacio. Esta tesis adopta precisamente ese enfoque combinado.

Entre las herramientas más utilizadas se encuentran los sensores de flujo vehicular, las cámaras de monitoreo, los sistemas de semaforización adaptativa y los paneles informativos para conductores. Estas tecnologías permiten ajustar en tiempo real la operación del tránsito de acuerdo con la demanda, reduciendo los tiempos de espera en las intersecciones y mejorando la eficiencia del sistema vial (Transportation Research Board, 2022; Carboni & Coskun, 2025).

En este sentido, la propuesta de Tulancingo se alinea con la literatura reciente al privilegiar medidas de intervención progresiva: semaforización y coordinación de nodos, seguridad peatonal, red ciclista, apertura de conexiones estratégicas y reorganización de flujos. La tesis asume que la mitigación efectiva de la congestión no depende de una solución aislada, sino de una cartera de acciones complementarias, técnicas y urbanísticamente coherentes.

La implementación de estrategias de gestión del tráfico puede contribuir significativamente a disminuir la congestión vehicular, reducir el consumo de combustible y mejorar la seguridad vial, especialmente en ciudades donde la expansión de la infraestructura resulta limitada o costosa.

1.7 Integración multimodal

La integración multimodal, también conocida como intermodalidad, se refiere a la articulación eficiente de distintos modos de transporte dentro de un mismo sistema urbano. Este enfoque busca facilitar la combinación de diversos medios de desplazamiento —como caminata, bicicleta, transporte público y automóvil— mediante infraestructuras adecuadas, señalización clara y accesibilidad universal (Hansel, 2025; van der Craats et al., 2025)

La dimensión institucional de la intermodalidad es igualmente importante. Hansel (2025) muestra que la implementación de hubs y redes intermodales depende de la gobernanza, la regulación del estacionamiento y la coordinación multinivel; van der Craats et al. (2025) añaden que los planes de movilidad sostenible deben incorporar explícitamente criterios de inclusión social; y Giesen et al. (2025) señalan que la integración modal constituye una prioridad para el transporte público latinoamericano. Todo ello es especialmente pertinente en ciudades donde las transferencias entre modos siguen resolviéndose de manera informal o insegura.

En términos de diseño urbano, la intermodalidad requiere que los puntos de transferencia entre modos de transporte cuenten con condiciones adecuadas para los usuarios, incluyendo andadores peatonales seguros, ciclopuertos, paradas de transporte público accesibles y conexiones directas entre distintos sistemas de movilidad. La coordinación entre modos permite optimizar el uso del espacio urbano, reducir los tiempos de traslado y disminuir la dependencia del automóvil particular.

La integración multimodal constituye uno de los principios fundamentales de la movilidad urbana sostenible, ya que promueve un sistema de transporte más equilibrado, eficiente y accesible para la población.

La tesis retoma esta discusión para sostener que en Tulancingo la intermodalidad no debe entenderse solo como la coexistencia de modos, sino como una condición de funcionalidad urbana: caminar, usar bicicleta, acceder al transporte público y completar trayectos sin recurrir necesariamente al automóvil. Esa lectura permite vincular la propuesta ciclista, la mejora semafórica y la reorganización del transporte público en una misma lógica de sistema.

1.8 Congestión vehicular y capacidad vial

La congestión vehicular constituye uno de los principales problemas de movilidad en las ciudades contemporáneas. Se produce cuando la demanda de tránsito supera la capacidad operativa de la infraestructura vial disponible, lo que provoca reducciones en la velocidad de circulación, incrementos en los tiempos de viaje y mayores niveles de estrés para los usuarios del sistema de transporte (Hansel, 2025; van der Craats et al., 2025)

Desde la perspectiva de la ingeniería de transporte, la congestión se analiza mediante la relación entre el volumen de tránsito y la capacidad de la vía, expresada comúnmente mediante el indicador volumen/capacidad (V/C). Este indicador permite estimar el grado de saturación de una infraestructura vial al comparar el flujo vehicular observado con el máximo que puede soportar una vía en condiciones normales de operación.

De acuerdo con el Highway Capacity Manual (HCM) (Transportation Research Board, 2022), la capacidad vial se define como el número máximo de vehículos que pueden pasar por un punto específico de la infraestructura durante un periodo determinado, bajo las condiciones prevalecientes de tráfico, control y geometría de la vía. Cuando el volumen vehicular se aproxima o supera esta capacidad, el sistema comienza a operar en condiciones inestables, lo que genera demoras, formación de colas y variaciones en la velocidad de circulación.

Para evaluar estas condiciones, se emplea el concepto de nivel de servicio (Level of Service, LOS), que clasifica la calidad de la operación del flujo vehicular en una escala de A a F. El nivel de servicio A representa condiciones de flujo libre con mínima interferencia entre vehículos, mientras que el nivel de servicio F corresponde a situaciones de saturación o colapso del sistema, caracterizadas por velocidades muy bajas, demoras significativas y congestión severa.

Un segundo consenso en la literatura es que la congestión urbana de las ciudades intermedias suele explicarse por una combinación de saturación puntual y fricción operativa: accesos laterales, giros, paradas, peatones, mezcla modal y control deficiente de las intersecciones. En estos contextos, los indicadores de capacidad deben interpretarse junto con la evidencia de campo y la estructura urbana, ya que una misma relación V/C puede producir efectos distintos según la localización de las actividades, el tránsito de paso, la jerarquía vial y la presencia de transporte público (Papadakis et al., 2024; Giesen et al., 2025).

La relación entre volumen, capacidad y nivel de servicio constituye una herramienta fundamental para analizar el funcionamiento de las redes viales urbanas. A partir de estos indicadores, es posible identificar intersecciones o corredores críticos donde la infraestructura opera cerca de sus límites de capacidad, lo que permite orientar intervenciones de gestión del tránsito o de rediseño vial (Transportation Research Board, 2022).

Asimismo, la congestión presenta características no lineales, donde pequeños incrementos en la demanda pueden generar incrementos desproporcionados en los tiempos de viaje y en la formación de colas. Este comportamiento se explica por la interacción entre vehículos y la reducción progresiva de la velocidad a medida que aumenta la densidad, fenómeno ampliamente documentado en la teoría del flujo vehicular.

En el contexto de las ciudades intermedias, el análisis de la congestión vehicular mediante indicadores como V/C y el nivel de servicio resulta especialmente útil, ya que permite identificar problemas operativos específicos sin requerir modelos de simulación complejos. Este tipo de análisis facilita la formulación de estrategias de movilidad orientadas a mejorar la eficiencia del sistema vial mediante medidas de gestión del tráfico, la reorganización del espacio vial o el fortalecimiento de los modos de transporte alternativos.

La conclusión crítica de esta tesis es que el análisis de la congestión en Tulancingo no puede limitarse a medir "cuántos vehículos caben" en una intersección. Resulta indispensable explicar cómo la forma urbana, la concentración de viajes y la gestión del espacio vial generan condiciones recurrentes de sobresaturación o de vulnerabilidad operativa. Sobre esa base se construye el diagnóstico del caso de estudio.

CAPÍTULO II

Fundamentos técnicos de la ingeniería vial y análisis de la congestión vehicular

2.1 Fundamentos del análisis de tránsito vehicular

El análisis del tránsito vehicular constituye una de las áreas fundamentales de la ingeniería de transporte, cuyo propósito es comprender el comportamiento del flujo vehicular sobre la infraestructura vial con el fin de garantizar condiciones adecuadas de seguridad, eficiencia y continuidad en la circulación. Según el HCM (Transportation Research Board, 2022), el estudio del tránsito se basa en el análisis de tres variables fundamentales: flujo, velocidad y densidad, que describen el funcionamiento del tráfico en una vía.

El análisis del tránsito vehicular mantiene vigencia en la ingeniería civil, pero en la literatura contemporánea se observa un desplazamiento de los modelos puramente mecanicistas hacia enfoques que integran datos operativos, el entorno urbano y el comportamiento de los usuarios. El HCM (Transportation Research Board, 2022) continúa siendo la referencia central para el flujo, la velocidad, la densidad y el desempeño de las instalaciones; no obstante, la investigación reciente advierte que la interpretación de estas variables debe vincularse con la fricción operativa y la forma de gestión del sistema (Anupriya et al., 2023; Carboni & Coskun, 2025).

El flujo vehicular representa el número de vehículos que atraviesan un punto específico de la infraestructura durante un intervalo determinado de tiempo, y se expresa comúnmente en vehículos por hora (veh/h). La velocidad corresponde a la rapidez promedio de desplazamiento de los vehículos dentro de un tramo de vía, generalmente expresada en kilómetros por hora (km/h). Por su parte, la densidad se define como el número de vehículos presentes en un tramo determinado de vía en un momento dado, expresado en vehículos por kilómetro (veh/km). Estas variables se relacionan mediante la ecuación fundamental del flujo vehicular:

$$Q = K \times V$$

Donde

Q representa el flujo vehicular,

K la densidad del tránsito y

V la velocidad promedio de los vehículos.

Desde el punto de vista operativo, la relación entre flujo, velocidad y densidad permite identificar el comportamiento dinámico del tránsito bajo distintas condiciones de demanda. En particular, la curva fundamental del tránsito describe cómo, a medida que aumenta la densidad vehicular, la velocidad tiende a disminuir progresivamente, hasta alcanzar un punto crítico donde el flujo máximo es obtenido. A partir de este punto, cualquier incremento adicional en la densidad provoca una caída en el flujo y el inicio de condiciones de congestión.

Este comportamiento es esencial para comprender la formación de cuellos de botella en la red vial, ya que permite anticipar la transición entre estados de flujo libre y flujo congestionado. En aplicaciones prácticas, este análisis facilita la identificación de tramos donde pequeñas variaciones en la demanda pueden generar efectos significativos en la operación del sistema.

El comportamiento de estas variables permite identificar el estado operativo del flujo de tránsito. En condiciones de flujo libre, los vehículos circulan con escasa interferencia entre sí y mantienen velocidades cercanas a la velocidad de diseño. A medida que aumenta la densidad vehicular, se incrementa la interacción entre vehículos y se reducen las velocidades de circulación. Cuando la densidad alcanza niveles elevados, se generan condiciones de congestión, caracterizadas por bajas velocidades, incremento de las demoras y formación de colas (Transportation Research Board, 2022). El análisis de estas relaciones constituye una herramienta fundamental para identificar tramos críticos en la red vial urbana y evaluar el grado de saturación de la infraestructura existente.

2.2 Capacidad y nivel de servicio de una vía

La capacidad vial se define como el volumen máximo de vehículos que puede circular por un tramo de vía o por una intersección durante un periodo determinado, bajo condiciones específicas de diseño geométrico, control del tránsito y operación vehicular (Transportation Research Board, 2022). Este concepto es esencial para evaluar el desempeño de una infraestructura vial y determinar si la oferta de capacidad es suficiente para atender la demanda de tránsito.

La capacidad y el nivel de servicio siguen siendo indicadores esenciales para la evaluación operativa, pero la literatura actual insiste en emplearlos con criterio contextual. La HCM 7.^a edición ofrece procedimientos robustos para instalaciones urbanas; sin embargo, Papadakis et al. (2024) y Carboni & Coskun (2025) muestran que el desempeño de una infraestructura también depende del patrón de control, de la mezcla modal y del ambiente urbano en el que se inserta. En consecuencia, el nivel de servicio no debe interpretarse como una propiedad intrínseca e inmutable de la vía, sino como el resultado de las condiciones operativas vigentes.

Para analizar la calidad de operación de una vía se emplea el concepto de nivel de servicio (Level of Service, LOS), establecido por el Highway Capacity Manual. Este indicador clasifica las condiciones de operación del flujo vehicular en seis categorías, de A a F (Transportation Research Board, 2022). El nivel de servicio A representa condiciones de flujo libre, en las que los vehículos circulan a alta velocidad y con la mínima interferencia. En contraste, el nivel de servicio F corresponde a situaciones de saturación o de congestión severa, caracterizadas por velocidades muy bajas, demoras significativas y la formación de largas colas.

Además del nivel de servicio, el análisis de capacidad incorpora indicadores complementarios como la demora promedio por vehículo, la longitud de cola y el grado de saturación, los cuales permiten una evaluación más detallada del desempeño operativo de una vía o intersección. Estos indicadores resultan especialmente relevantes en contextos urbanos, donde las interrupciones al flujo vehicular son frecuentes debido a la presencia de intersecciones, cruces peatonales y accesos laterales.

En este sentido, el nivel de servicio debe interpretarse como un indicador integral que refleja no solo la capacidad física de la infraestructura, sino también las condiciones de operación del sistema de tránsito, incluyendo la eficiencia en la asignación de tiempos semafóricos y la interacción entre distintos usuarios de la vía.

Uno de los indicadores más utilizados para evaluar el desempeño de una vía es la relación volumen/capacidad (V/C), que compara el volumen de tránsito observado con la capacidad máxima de la infraestructura. Cuando el valor de V/C se aproxima a 1.0, la vía opera cerca

de su límite de capacidad. Valores superiores a 1.0 indican saturación, mientras que valores inferiores a 0.8 suelen considerarse aceptables en contextos urbanos.

El análisis de estos indicadores permite identificar puntos críticos en la red vial y constituye la base para el diagnóstico de problemas de congestión vehicular.

2.3 Diseño geométrico vial

El diseño geométrico vial comprende el conjunto de parámetros técnicos que definen la configuración física de una vía, incluyendo su alineamiento horizontal y vertical, ancho de calzada, pendientes, radios de curvatura, visibilidad y diseño de intersecciones (SCT, 2015). Estos elementos se establecen con el objetivo de garantizar condiciones adecuadas de seguridad, confort y eficiencia para los usuarios de la infraestructura.

Uno de los parámetros fundamentales del diseño geométrico es la velocidad de diseño, definida como la velocidad máxima que los conductores pueden mantener con seguridad en condiciones operativas favorables. Este valor determina otros elementos del diseño vial, como los radios de curvatura, las distancias de visibilidad y las pendientes longitudinales.

Adicionalmente, el diseño geométrico vial debe considerar la interacción entre los distintos modos de transporte, incorporando criterios de seguridad para usuarios vulnerables como peatones y ciclistas. En entornos urbanos, esto implica la integración de elementos como banquetas continuas, cruces seguros, islas de refugio y carriles exclusivos, que permitan reducir los conflictos entre usuarios y mejorar la legibilidad de la vía.

La correcta configuración geométrica de una vialidad también influye en el comportamiento de los conductores, ya que elementos como el ancho de carril, el radio de curvatura y la visibilidad condicionan la velocidad de operación y la toma de decisiones. Por ello, el diseño geométrico no solo define la capacidad de la vía, sino también su nivel de seguridad y funcionalidad.

Las características geométricas de una vía varían según su jerarquía en la red urbana. Las vialidades primarias suelen diseñarse para velocidades de entre 60 y 80 km/h, mientras que

las vialidades secundarias y locales presentan velocidades de diseño menores, generalmente entre 30 y 50 km/h.

En contextos urbanos, el diseño geométrico debe considerar no solo el tránsito vehicular, sino también la interacción con peatones, ciclistas y el transporte público. Por ello, las intervenciones contemporáneas de ingeniería vial buscan equilibrar la funcionalidad de la vía con criterios de seguridad vial y de accesibilidad urbana (SCT, 2015; SEDATU, 2019a).

La investigación reciente en diseño geométrico urbano subraya que las variables tradicionales —ancho, radios, visibilidad, pendientes y velocidad de diseño— deben reinterpretarse a la luz de los objetivos de seguridad vial, de accesibilidad universal y de convivencia modal. Deliali et al. (2021) y Preston & Pulugurtha (2021) muestran que el diseño en intersecciones puede afectar simultáneamente la seguridad ciclista y el desempeño vehicular, mientras que SEDATU (2019a) propone integrar el "funcionamiento como calle" y no solo el "funcionamiento como corredor de tránsito".

2.4 Intersecciones y su influencia en la congestión

Las intersecciones constituyen los puntos de mayor conflicto dentro de una red vial, ya que en ellas convergen distintos flujos vehiculares y peatonales que deben coordinarse para garantizar una circulación segura y eficiente. Su diseño y control influyen directamente en el desempeño operativo de los corredores viales.

Las intersecciones concentran la mayor parte de las pérdidas operativas y de los riesgos de conflicto en las redes urbanas. La evidencia reciente sobre infraestructura ciclista y peatonal indica que el tratamiento geométrico y el control del cruce son determinantes para la seguridad y la percepción del usuario. Deliali et al. (2021), Friel et al. (2023), Singleton & Poudel (2023) y Rivera Olsson & Eldér (2023) muestran que la forma del cruce, el radio de giro, la visibilidad y la asignación de prioridades alteran decisivamente el comportamiento de conductores y usuarios vulnerables.

Desde el punto de vista operativo, las intersecciones también son el lugar donde se manifiesta con mayor claridad la fricción del sistema: giros, fases semafóricas, colas, interferencia entre paradas y movimientos peatonales. Por ello, en esta tesis, su análisis se considera central para explicar la congestión observada y justificar propuestas como la semaforización, la canalización de los movimientos y ajustes geométricos puntuales.

Desde el punto de vista de la ingeniería de tránsito, las intersecciones representan puntos críticos donde se concentra la mayor parte de las demoras y conflictos del sistema vial. La capacidad de una intersección no depende únicamente del volumen de vehículos, sino también de factores como la distribución de movimientos, la proporción de giros, la existencia de fases protegidas y la eficiencia en la asignación de tiempos semafóricos.

Asimismo, la operación de una intersección puede optimizarse mediante la coordinación semafórica, la implementación de carriles exclusivos para giros y la reducción de puntos de conflicto mediante soluciones geométricas como las rotondas. Estas estrategias permiten mejorar la fluidez del tránsito y reducir tanto los tiempos de espera como la probabilidad de accidentes.

De acuerdo con el Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras (SICT, 2024), la eficiencia de una intersección depende del tipo de control implementado,

que puede incluir señalización de alto, semaforización, rotondas o sistemas de prioridad direccional. En el caso de intersecciones semaforizadas, variables como el tiempo de ciclo, la sincronización de señales y la distribución de fases influyen directamente en los niveles de demora y en la formación de colas.

En redes urbanas con altos volúmenes de tránsito, las intersecciones suelen convertirse en puntos críticos donde se concentran los problemas de congestión. La implementación de estrategias de gestión del tránsito, como la optimización semafórica o la construcción de rotondas, puede contribuir a mejorar significativamente el flujo vehicular. Diversos estudios han demostrado que las rotondas bien diseñadas pueden incrementar la capacidad de paso y reducir los conflictos vehiculares en comparación con intersecciones tradicionales, siempre que su diseño geométrico y su contexto de implantación sean adecuados (Transportation Research Board, 2022; Preston & Pulugurtha, 2021).

2.5 Factores que inciden en la congestión vehicular

La congestión vehicular es un fenómeno complejo que resulta de la interacción entre la demanda de desplazamientos y la capacidad de la infraestructura vial. De acuerdo con la literatura técnica, entre los principales factores que contribuyen a la congestión vehicular se encuentran el crecimiento del parque vehicular, el incremento de los viajes motorizados, la deficiente gestión del tránsito, el estacionamiento en vía pública y el uso ineficiente del suelo urbano (Transportation Research Board, 2022; Carboni & Coskun, 2025).

En el caso de Tulancingo, la congestión también se relaciona con la concentración espacial de actividades económicas y de servicios, lo que genera flujos de desplazamiento intensos en determinados corredores durante los periodos de hora pico. A ello se suma la insuficiencia de alternativas de transporte público eficientes y la limitada infraestructura destinada a modos de movilidad no motorizados (Atlas de Riesgos del Municipio de Tulancingo, 2017; Gobierno Municipal de Tulancingo, 2020).

Desde la perspectiva de la ingeniería vial, la congestión debe abordarse mediante un enfoque integral que combine intervenciones en la infraestructura, mejoras en la gestión del tránsito y estrategias orientadas a diversificar los modos de transporte disponibles.

La congestión urbana responde a una combinación de factores de demanda, de estructura urbana y de operación del sistema. Abdullah et al. (2022) y Zhang et al. (2023) muestran que el comportamiento modal está mediado por variables socioeconómicas y atributos del sistema de transporte; Giesen et al. (2025) señalan que la pérdida de competitividad del transporte público en América Latina empuja los viajes hacia modos individuales; y Carboni & Coskun (2025) recuerdan que la gestión deficiente del tránsito incrementa los impactos ambientales, además de las demoras.

Es importante destacar que la congestión vehicular no responde únicamente a un incremento en el número de vehículos, sino a la interacción de múltiples factores que afectan la capacidad efectiva de la infraestructura. Entre estos factores se encuentran la presencia de estacionamiento en vía pública, la ocupación irregular del espacio vial, la falta de sincronización semafórica y la existencia de accesos no controlados.

Asimismo, el comportamiento de los usuarios juega un papel relevante en la generación de congestión, ya que maniobras como cambios de carril abruptos, giros indebidos y detenciones inesperadas pueden reducir significativamente la capacidad de la vía. Estos elementos evidencian que la congestión es un fenómeno complejo que requiere soluciones integrales, más allá de la simple ampliación de vialidades.

2.6 Enfoques modernos de mitigación de congestión

En la actualidad, los enfoques más efectivos para mitigar la congestión vehicular combinan soluciones de ingeniería de tránsito con estrategias de movilidad sostenible. Entre las medidas más utilizadas se encuentran la optimización de intersecciones, la sincronización semafórica, la gestión de la demanda de transporte (Transport Demand Management, TDM) y la promoción del transporte público.

Los enfoques contemporáneos de mitigación de la congestión coinciden en que la respuesta más sólida es la combinación de gestión, rediseño y cambio modal. Anupriya et al. (2023) cuestionan la eficacia estructural de ampliar la capacidad; Papadakis et al. (2024) reúnen evidencia sobre mejores prácticas que articulan el transporte público, la movilidad activa y el desincentivo del automóvil; y Hansel (2025) enfatiza el papel de la gobernanza y del estacionamiento como palancas de cambio en la transición de movilidad.

El rediseño vial bajo criterios sostenibles también propone intervenciones de bajo costo que permiten mejorar la eficiencia del sistema vial sin recurrir necesariamente a la ampliación de la infraestructura. Entre estas medidas se incluyen la implementación de carriles reversibles, la delimitación adecuada de zonas de carga y descarga, la regulación del estacionamiento en vía pública y la aplicación de sistemas de control semafórico adaptativo mediante tecnologías de ITS.

La integración de estas estrategias con políticas de movilidad activa, como ciclovías y andadores peatonales, permite reducir los tiempos de viaje, mejorar la seguridad vial y disminuir las emisiones contaminantes. De esta manera, la ingeniería civil contemporánea adopta un enfoque sistémico que considera la interacción entre la infraestructura, la operación del tránsito y el comportamiento de los usuarios del sistema de transporte (Papadakis et al., 2024; SEDATU, 2019a)

En este contexto, la incorporación de tecnologías inteligentes de transporte (ITS) permite mejorar la gestión del tránsito mediante el monitoreo en tiempo real, la adaptación de los ciclos semafóricos y la optimización de la operación vial. Estas herramientas facilitan la toma de decisiones basada en datos y permiten responder de manera dinámica a las variaciones en la demanda de tránsito.

De igual manera, los enfoques contemporáneos priorizan la gestión de la demanda de transporte, promoviendo estrategias como el uso compartido del automóvil, la implementación de horarios escalonados y el fortalecimiento del transporte público. Estas medidas buscan reducir la presión sobre la infraestructura existente y mejorar la eficiencia global del sistema de movilidad.

CAPÍTULO III

Contexto territorial, urbano y vial del municipio de Tulancingo, Hidalgo

3.1 Localización geográfica y contexto regional

Este capítulo funciona como marco contextual de la investigación. Su objetivo no es solo describir el territorio municipal, sino también mostrar cómo la localización, la estructura urbana, las centralidades, los equipamientos y el sistema vial condicionan la generación de viajes y la operación del tránsito. En esa medida, el contexto territorial se integra al marco teórico como la escala en la que se materializan los conceptos previamente discutidos.

El municipio de Tulancingo de Bravo se ubica en la región oriente del estado de Hidalgo y forma parte del Valle de Tulancingo, una de las zonas con mayor dinamismo económico y urbano de la entidad. Su ubicación estratégica dentro del sistema de ciudades del centro del país le permite desempeñar un papel relevante como nodo de articulación territorial entre el estado de Hidalgo y la zona metropolitana del Valle de México.

La ciudad se localiza aproximadamente a 95 kilómetros al noreste de la Ciudad de México y a 45 kilómetros al este de Pachuca de Soto, capital del estado. Sus coordenadas geográficas se encuentran entre los 20°05' y 20°15' de latitud norte y los 98°18' y 98°27' de longitud oeste, con una altitud promedio de 2,140 metros sobre el nivel del mar.

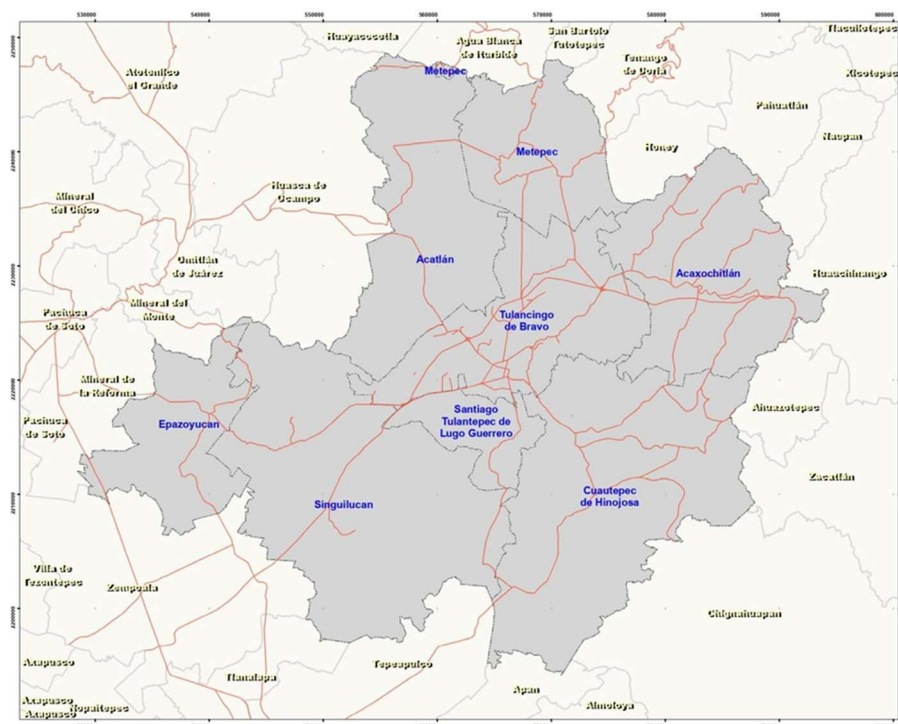
El municipio limita al norte con Cuautepec de Hinojosa y Singuilucan, al sur con Acatlán y Acaxochitlán, al este con Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, y al oeste con Metepec y Singuilucan. (PIMUS Tulancingo, 2018; Gobierno Municipal de Tulancingo, 2020).

Tulancingo cuenta con una superficie aproximada de 290 km², de los cuales una proporción significativa corresponde a la zona urbana y periurbana de la cabecera municipal. Su posición dentro del corredor carretero México–Tuxpan–Tampico le confiere una función estratégica como punto de conexión logística y comercial entre el centro del país y la región del Golfo de México. (PIMUS Tulancingo, 2018).

Desde una perspectiva de movilidad, esta localización regional otorga a Tulancingo una doble función: por un lado, actúa como centro urbano que concentra viajes internos asociados a actividades comerciales, educativas y de servicios; por otro, opera como nodo

de tránsito para desplazamientos intermunicipales y regionales. Esta superposición de escalas de movilidad incrementa la presión sobre la red vial urbana, particularmente en aquellos corredores que simultáneamente cumplen funciones de acceso, distribución local y conexión regional.

En términos funcionales, esta condición explica por qué ciertas vialidades del municipio no solo canalizan viajes generados por la dinámica urbana interna, sino también flujos de paso que no tienen como destino final el centro de la ciudad. La coexistencia de ambos tipos de tránsito contribuye a la saturación de intersecciones estratégicas y refuerza la necesidad de distinguir entre movilidad local y movilidad regional al momento de formular propuestas de intervención.



Mapa 1. Localización geográfica del municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo.

Fuente: Ayuntamiento de Tulancingo (2015).

3.2 Fisiografía, relieve y clima

El municipio se localiza dentro de la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico Transversal, caracterizada por la presencia de valles intermontanos, lomeríos suaves y sierras de altitud media. Tulancingo se asienta sobre una depresión tectónica delimitada por la Sierra de las Navajas al oeste y la Sierra de Huayacocotla al este.

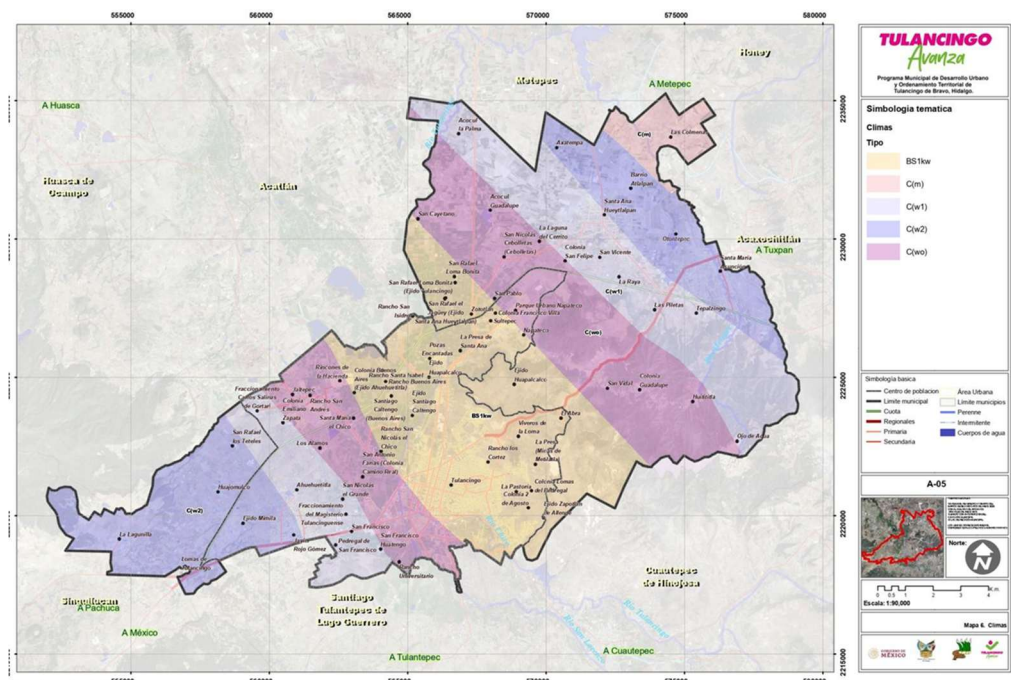
El relieve predominante en la zona urbana es plano a ligeramente ondulado, con pendientes generalmente inferiores al 5 %, lo que históricamente ha favorecido la expansión horizontal del asentamiento urbano. No obstante, la expansión hacia zonas con pendientes moderadas ha incrementado los costos de urbanización y los riesgos asociados a procesos de erosión y de escurrimiento superficial.

Estas condiciones fisiográficas también inciden en la forma en que se estructura la movilidad urbana. En ciudades asentadas sobre terrenos predominantemente planos, la expansión territorial suele producirse con mayor rapidez y menor restricción física, lo que favorece patrones urbanos extensivos y una creciente separación entre zonas habitacionales y áreas de actividad. Como consecuencia, aumentan las distancias de viaje y se incrementa la dependencia de modos motorizados para resolver desplazamientos cotidianos.

De igual manera, la relativa facilidad topográfica para urbanizar no garantiza por sí misma una movilidad eficiente, ya que, sin una planeación adecuada, el crecimiento horizontal tiende a concentrar la circulación en pocos corredores estructurantes. En este sentido, el relieve favorable de Tulancingo debe entenderse no solo como una ventaja física para el desarrollo urbano, sino también como un factor que ha permitido un patrón de expansión que, al no acompañarse de una red vial suficientemente diversificada, ha contribuido a la congestión actual.

En términos climáticos, de acuerdo con la Actualización del Atlas de Riesgos del Municipio de Tulancingo (2017), el municipio presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura media anual de aproximadamente 14.5 °C y una precipitación media anual cercana a 600 mm

Las condiciones climáticas influyen en el funcionamiento de la infraestructura vial y en los patrones de movilidad urbana, ya que las lluvias intensas pueden acelerar el deterioro de los pavimentos y reducir la velocidad de circulación vehicular. Al mismo tiempo, el clima templado favorece el uso potencial de los modos de movilidad activa, como el desplazamiento peatonal o la bicicleta. (DataMéxico, 2023; PIMUS Tulancingo, 2018).



Mapa 2. Climatología del municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo.

Fuente: Actualización del Atlas de Riesgos del Municipio de Tulancingo (2017).

3.3 Geología y tipo de suelo

El subsuelo del municipio está conformado principalmente por depósitos volcánicos y aluviales recientes, asociados a la actividad geológica del Eje Neovolcánico Transversal. Entre los materiales predominantes se encuentran tobas volcánicas, basaltos, andesitas y depósitos arcillo-arenosos.

Los tipos de suelo más representativos en el territorio municipal son los Feozems y Andosoles, caracterizados por una textura media y una buena capacidad de retención de agua, lo que favorece la actividad agrícola (INEGI, 2020). En las zonas bajas también se presentan Vertisoles, suelos arcillosos con comportamiento expansivo ante cambios de humedad.

Estas características geológicas y edafológicas influyen directamente en el diseño, la construcción y el mantenimiento de la infraestructura vial, ya que condicionan la capacidad de soporte de los pavimentos. En algunas áreas urbanas se han identificado problemas asociados a hundimientos diferenciales, fisuración del pavimento y deformaciones,

particularmente en zonas donde no se ha realizado un control adecuado de los escurrimientos pluviales.

En términos de movilidad urbana, estas condiciones del subsuelo tienen implicaciones que van más allá del diseño estructural de los pavimentos. La degradación acelerada de las superficies de rodamiento afecta la regularidad del flujo vehicular, incrementa los costos de mantenimiento y puede reducir la velocidad de operación en tramos deteriorados. Asimismo, el mal estado del pavimento genera incomodidad operativa para el transporte público y para los modos no motorizados, particularmente en corredores donde la infraestructura ciclista o peatonal es deficiente.

Por ello, el análisis de la congestión en contextos urbanos como Tulancingo no debe desligarse de las condiciones físico-territoriales que afectan la calidad y durabilidad de la infraestructura. La capacidad funcional de una vialidad no depende únicamente de su sección geométrica o de su volumen de tránsito, sino también de su estado físico y del comportamiento estructural del terreno sobre el que se desarrolla.

3.4 Hidrografía y recursos naturales

El municipio forma parte de la Región Hidrológica 27 (Tuxpan–Nautla) y se encuentra dentro de la Subcuenca del Río Tulancingo, que atraviesa la zona urbana en dirección oeste-este.

Este río, junto con afluentes como el Arroyo Zapotlán y el Canal San Nicolás, desempeña un papel importante como sistema natural de drenaje pluvial. Sin embargo, el crecimiento urbano ha reducido progresivamente las áreas de recarga y ha ocupado algunos cauces naturales, lo que ha incrementado la vulnerabilidad ante inundaciones locales durante la temporada de lluvias. (INEGI, 2020; DataMéxico, 2023; PIMUS Tulancingo, 2018).

La red hidrográfica del municipio también incluye canales de riego y pequeños cuerpos de agua utilizados principalmente para actividades agrícolas. La cobertura vegetal original, compuesta por pastizales y bosques de encino-pino, ha disminuido considerablemente debido al crecimiento urbano y a la expansión de la frontera agrícola. (PIMUS Tulancingo, 2018; Gobierno Municipal de Tulancingo, 2020).

La relación entre hidrografía, urbanización y movilidad también resulta relevante en el funcionamiento cotidiano del sistema vial. La ocupación de cauces, la disminución de

superficies de infiltración y la alteración del drenaje natural incrementan la vulnerabilidad de ciertas vialidades ante encharcamientos e inundaciones locales, lo que puede reducir temporalmente la capacidad operativa de la red y agravar los problemas de congestión en temporada de lluvias.

En este sentido, la movilidad urbana no debe analizarse únicamente como un fenómeno asociado a la demanda de viajes, sino también como un sistema sensible a condiciones ambientales y territoriales. La resiliencia de la infraestructura vial depende, en parte, de su compatibilidad con la estructura hidrológica del territorio, aspecto particularmente importante en ciudades donde el crecimiento urbano ha modificado de forma significativa los patrones naturales de escurrimiento.

3.5 Estructura demográfica y socioeconómica

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI, el municipio de Tulancingo cuenta con una población aproximada de 163 000 habitantes y una densidad media de 562 habitantes por kilómetro cuadrado.

Entre los años 2000 y 2020, la tasa de crecimiento anual promedio fue de 1.6 %, impulsada principalmente por la migración proveniente de municipios cercanos y por el desarrollo de nuevos conjuntos habitacionales en la periferia urbana.

La estructura demográfica muestra una población relativamente joven, ya que alrededor del 55 % de los habitantes tiene menos de 35 años, lo que implica una alta demanda de movilidad asociada a actividades educativas, laborales y comerciales.

En términos económicos, el municipio presenta una estructura productiva dominada por los sectores del comercio (38 %) y de los servicios (34 %), seguidos por las actividades industriales y de la construcción (DataMéxico, 2023). Este perfil económico genera importantes flujos de movilidad hacia las zonas comerciales y de servicios del centro urbano.

La composición demográfica y económica del municipio influye de forma directa en los patrones de movilidad cotidiana. Una población relativamente joven y económicamente activa tiende a generar una alta intensidad de desplazamientos por motivos de trabajo, estudio, consumo y acceso a servicios. Cuando estos destinos se concentran en sectores

específicos de la ciudad, la demanda de viaje se vuelve espacialmente desigual y se canaliza hacia ciertos corredores con mayor intensidad en periodos definidos del día.

Del mismo modo, la predominancia de actividades terciarias, como el comercio y los servicios, favorece una movilidad con alta rotación de usuarios, viajes de corta y mediana distancia y una importante demanda de accesibilidad hacia el centro urbano. Esta condición ayuda a explicar la elevada presión sobre vialidades que conectan áreas residenciales con zonas comerciales y administrativas, así como la coexistencia de viajes regulares con viajes de propósito múltiple en los mismos ejes de circulación.

El crecimiento del parque vehicular ha sido particularmente significativo en las últimas décadas. Mientras que en 2005 se registraban alrededor de 35,000 vehículos, para 2020 la cifra superaba las 70,000 unidades, lo que representa una tasa aproximada de un vehículo por cada 2.3 habitantes. Este incremento, no acompañado de mejoras equivalentes en la infraestructura vial o en el sistema de transporte público, ha contribuido directamente al aumento de la congestión vehicular.

3.6 Estructura urbana y uso del suelo

El patrón urbano de Tulancingo presenta una configuración radial-concéntrica, con un centro histórico consolidado que concentra actividades comerciales, administrativas y de servicios, y una expansión periférica que se ha desarrollado de manera relativamente irregular.

El uso del suelo urbano se distribuye principalmente en áreas habitacionales (55 %), zonas comerciales y de servicios (22 %), áreas industriales (10 %) y equipamientos urbanos (8 %).

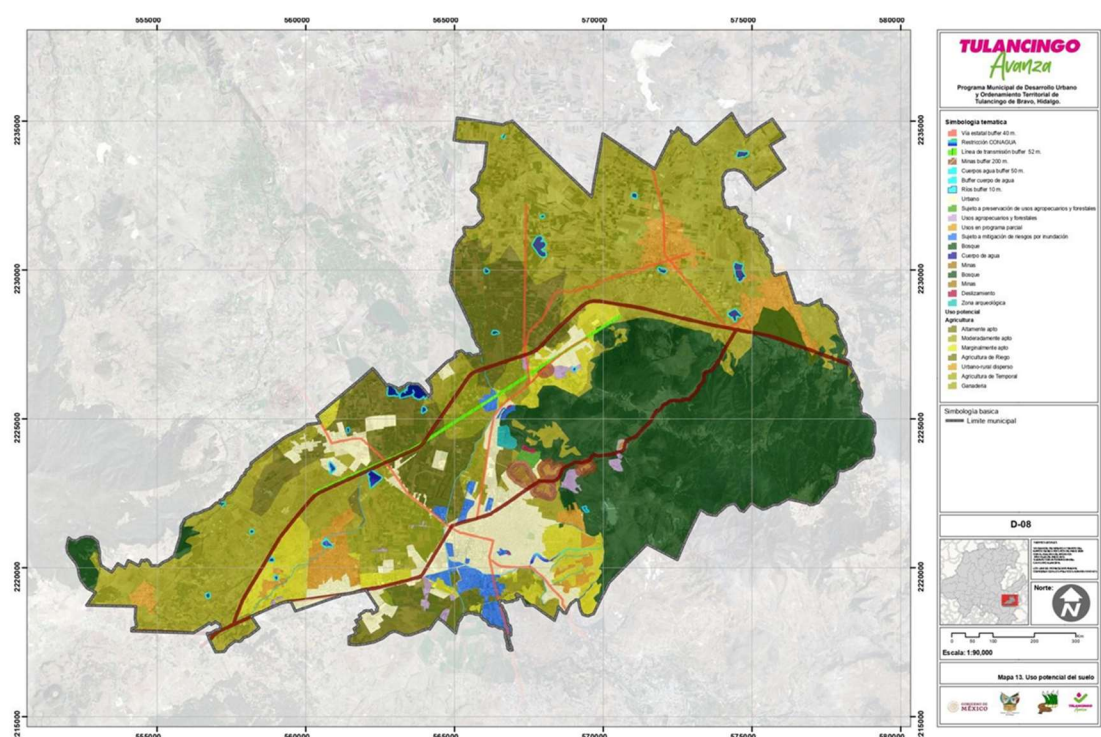
Durante las últimas décadas, el crecimiento urbano se ha orientado principalmente hacia el sur y el oriente del municipio, siguiendo los corredores que conectan con la carretera México–Tuxpan. No obstante, esta expansión ha ocurrido en muchos casos sin la infraestructura vial y de servicios suficiente, lo que ha generado problemas de conectividad y cuellos de botella en los accesos a la ciudad.

El centro histórico continúa siendo el principal polo de atracción de viajeros, concentrando funciones administrativas, comerciales y financieras. Esta situación provoca altos niveles de

tráfico en vialidades como Miguel Hidalgo, 21 de Marzo y Manuel Fernando Soto, especialmente durante las horas de mayor afluencia.

Desde la perspectiva de la movilidad, la estructura urbana descrita configura un modelo de desplazamiento radial, en el que una proporción significativa de los viajes converge hacia el centro de la ciudad. Este patrón genera una carga desproporcionada sobre ciertas vialidades primarias y secundarias, particularmente cuando la red urbana carece de suficientes rutas alternativas o de centralidades complementarias que distribuyan mejor las actividades en el territorio.

La relación entre uso del suelo y movilidad resulta fundamental para comprender la congestión urbana, ya que la localización de funciones urbanas determina en gran medida la dirección, intensidad y temporalidad de los viajes. En el caso de Tulancingo, la persistencia de un centro altamente concentrador y una periferia predominantemente habitacional refuerzan la dependencia de una red vial estructurada en pocos corredores, lo que incrementa la vulnerabilidad del sistema ante aumentos de demanda y conflictos operativos.



Mapa 3. Uso actual del suelo en la cabecera municipal de Tulancingo de Bravo, Hidalgo.

Fuente: Actualización del Atlas de Riesgos del Municipio de Tulancingo (2017).

3.7 Equipamiento urbano y servicios

Tulancingo cuenta con una red relativamente amplia de equipamientos urbanos, aunque su distribución territorial presenta ciertos desequilibrios.

En el ámbito educativo, existen más de 200 instituciones, incluidos centros de educación superior como el Instituto Tecnológico de Tulancingo y la Universidad Politécnica de Tulancingo.

En el sector salud destacan el Hospital General de Tulancingo, unidades del IMSS y ISSSTE, así como clínicas privadas que atienden a la población local y regional.

La infraestructura recreativa y deportiva incluye unidades deportivas, parques urbanos y espacios abiertos, aunque en algunos casos presentan limitaciones en el mantenimiento o conectividad peatonal.

En el ámbito comercial, el municipio cuenta con mercados tradicionales, centros comerciales como Plaza Patio y Plaza del Valle, así como con una intensa actividad comercial en el centro histórico.

La concentración de estos equipamientos en el centro urbano refuerza los flujos diarios de desplazamiento desde las zonas periféricas hacia el núcleo central de la ciudad, lo que incrementa la presión sobre las principales vías de acceso.

La distribución territorial del equipamiento urbano es un componente decisivo en la generación de viajes, ya que los servicios educativos, de salud, comercio y administración actúan como polos de atracción cotidiana para una parte importante de la población. Cuando estos equipamientos se concentran en áreas centrales, la ciudad tiende a reproducir patrones de movilidad pendular, en los que amplios sectores periféricos dependen de los mismos corredores para satisfacer necesidades básicas de acceso.

En este contexto, el análisis de la congestión no debe reducirse a la infraestructura vial en sí misma, sino incluir la localización de los equipamientos como variable explicativa de la demanda. La forma en que se distribuyen los servicios urbanos en el territorio influye

directamente en la intensidad de uso de ciertas vialidades y en la presión que enfrentan las intersecciones estratégicas durante las horas de mayor actividad.

3.8 Sistema vial y transporte

El sistema vial del municipio se organiza jerárquicamente en tres niveles principales:

Vías primarias, entre las que destacan los Boulevard Emiliano Zapata, Miguel Hidalgo, Las Torres, Quetzalcóatl y Centenario.

Vías secundarias, como las avenidas 21 de Marzo y Manuel Fernando Soto, que conectan distintos sectores de la ciudad.

Vías locales, compuestas por calles de colonias y barrios, muchas de las cuales presentan limitaciones geométricas o pavimentos deteriorados.

La forma en que se organiza jerárquicamente la red vial determina la distribución de funciones dentro del sistema urbano de movilidad. En términos operativos, una red equilibrada requiere que cada tipo de vialidad cumpla una función específica: las vías primarias deben canalizar flujos de mayor alcance, las secundarias distribuir el tránsito entre sectores urbanos y las locales atender accesos de baja velocidad. Cuando esta diferenciación funcional se debilita, una misma vía tiende a absorber múltiples tipos de movimiento, lo que reduce su eficiencia.

En Tulancingo, esta condición se manifiesta en la superposición de tránsito local, transporte público, movimientos peatonales y flujos regionales sobre corredores con capacidad limitada y escasa segregación funcional. Esta mezcla incrementa la fricción operativa, favorece la formación de cuellos de botella y dificulta que la red responda de manera eficiente a los incrementos de demanda en periodos pico.

Las vías primarias concentran gran parte del tránsito intermunicipal y regional, lo que genera altos niveles de carga vehicular durante las horas pico. Entre los problemas más frecuentes se encuentran la ocupación de carriles por estacionamiento en la vía pública, el diseño inadecuado de intersecciones, la falta de sincronización semafórica y la escasez de infraestructura para peatones y ciclistas.

El transporte público urbano opera mediante aproximadamente 40 rutas de microbuses y combis, sin un sistema de control centralizado. La superposición de trayectos provoca la concentración de unidades en los mismos corredores, lo que reduce la eficiencia operativa del sistema y contribuye a la congestión vehicular.

La configuración actual del transporte público también refleja una lógica de competencia por el espacio vial más que de integración funcional del sistema. La superposición de trayectos, la falta de control centralizado y las maniobras frecuentes de ascenso y descenso en corredores principales generan interferencias que afectan tanto al propio transporte colectivo como al resto de los usuarios de la vía. En consecuencia, la congestión observada no puede atribuirse exclusivamente al automóvil particular, sino también a la forma en que opera el sistema de transporte público dentro de la red urbana.



Ilustración 9. Congestión vehicular en la hora pico en Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: La Nota Hidalguense.

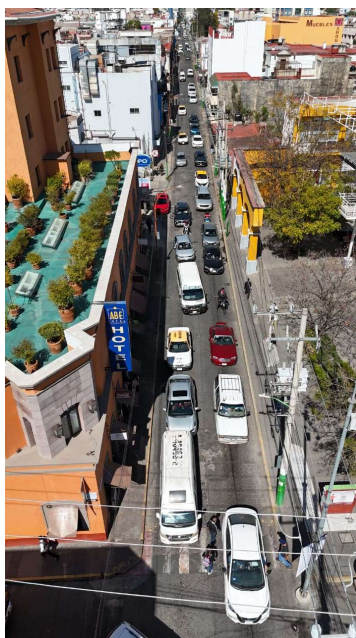


Ilustración 10. Congestión vehicular en la calle Benito Juárez, en Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).

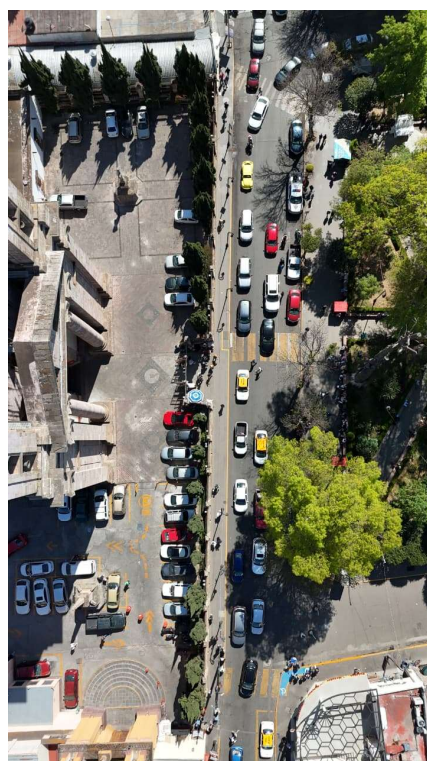


Ilustración 11. Congestión vehicular en la calle Manuel Fernando Soto, en Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).

3.9 Problemática urbana y ambiental vinculada a la movilidad

El patrón actual de movilidad en Tulancingo refleja una creciente dependencia del automóvil particular, resultado de la expansión urbana periférica y de la limitada disponibilidad de alternativas de transporte sostenibles.

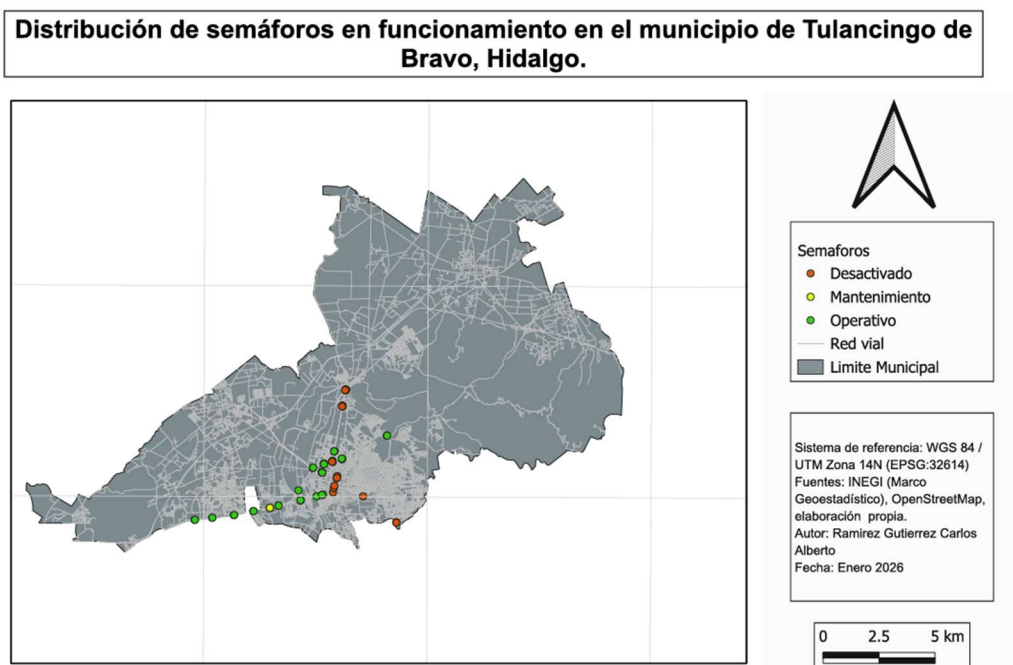
Esta situación genera impactos en distintos ámbitos. Desde el punto de vista ambiental, se observa un incremento en las emisiones de dióxido de carbono y de material particulado, así como en los niveles de ruido urbano. En el ámbito social, la congestión vehicular provoca pérdida de tiempo en los desplazamientos cotidianos, mayores niveles de estrés y desigualdades en el acceso al transporte público.

En términos económicos, el aumento de los tiempos de viaje y del consumo de combustible implica mayores costos de operación para los usuarios del sistema de transporte y una reducción de la productividad urbana.

En consecuencia, la congestión vehicular debe entenderse como el resultado de una estructura urbana en la que el crecimiento físico de la ciudad y el desarrollo del sistema de transporte no han evolucionado de manera coordinada.

Esta problemática debe interpretarse como un proceso acumulativo en el que las decisiones urbanas, de infraestructura y de gestión se refuerzan mutuamente. La expansión urbana, cuando no se acompaña de una diversificación modal y de una adecuada jerarquización vial, incrementa la exposición del sistema a condiciones de congestión recurrente. A su vez, la congestión refuerza la pérdida de calidad del espacio urbano, deteriora la experiencia de viaje y profundiza la preferencia por soluciones individuales motorizadas.

En consecuencia, la movilidad urbana en Tulancingo no puede entenderse como una cuestión exclusivamente técnica de tránsito, sino como una expresión territorial de desequilibrios más amplios entre forma urbana, localización de actividades, oferta de transporte y gestión del espacio público. Esta lectura permite sustentar la necesidad de intervenciones integrales que articulen criterios urbanos, operativos y ambientales.



Mapa 4. Distribución de semáforos en funcionamiento en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo.

Fuente: elaboración propia con base en un levantamiento de campo (2025).

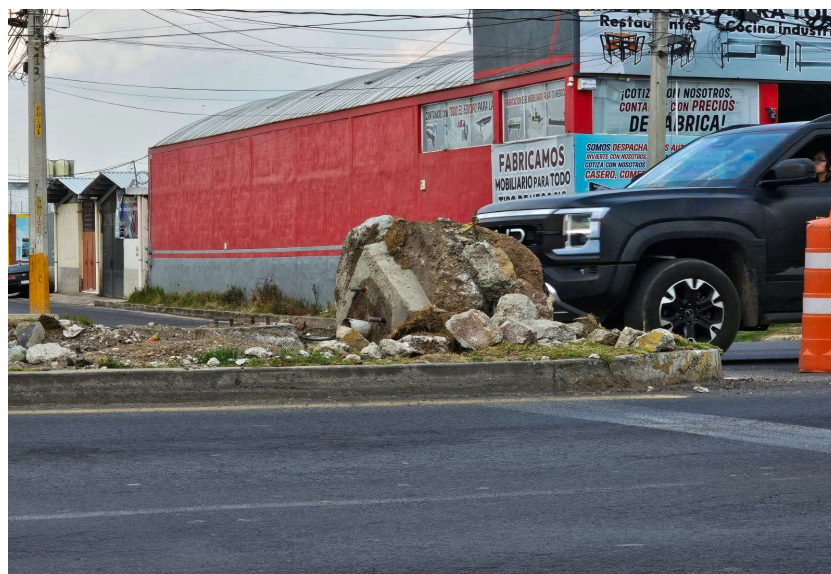


Ilustración 12. Condiciones de la infraestructura semafórica en Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).



Ilustración 13. Estado de los semáforos urbanos en Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).

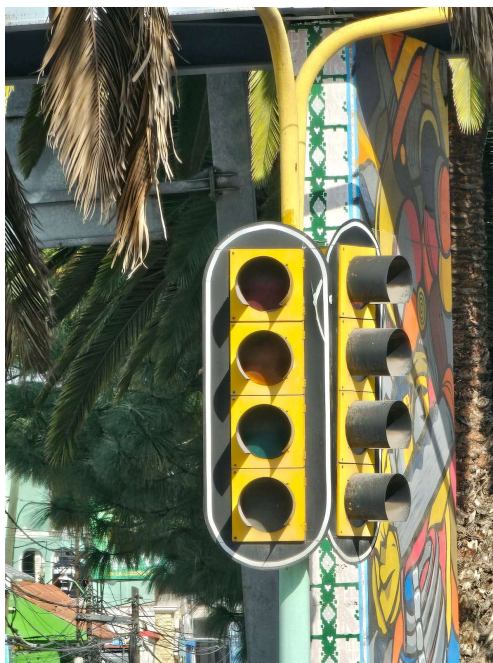


Ilustración 14. Infraestructura semafórica en intersecciones urbanas de Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).

3.10 Síntesis del contexto municipal

El análisis territorial, urbano y vial del municipio de Tulancingo permite identificar una serie de factores estructurales que influyen en la dinámica actual de la movilidad urbana. Entre ellos destacan el crecimiento urbano periférico, la concentración funcional del centro urbano, el incremento acelerado del parque vehicular, las limitaciones de la infraestructura vial y la ausencia de alternativas de transporte sostenibles.

Estos elementos contribuyen a la generación de condiciones de congestión vehicular en los principales corredores de la ciudad, particularmente durante los periodos de mayor demanda.

La información presentada en este capítulo constituye la base contextual para el desarrollo del diagnóstico vial y el análisis operativo del tránsito urbano, los cuales permitirán identificar los puntos críticos de la red vial y formular propuestas de movilidad sostenible en los capítulos siguientes.

En conjunto, el contexto municipal de Tulancingo muestra que la congestión vehicular es el resultado de una estructura urbana que ha concentrado funciones, expandido distancias y sobrecargado una red vial con limitada capacidad de adaptación. La ciudad combina condiciones de centralidad intensa, crecimiento periférico y mezcla de flujos urbanos y regionales, lo que configura un escenario especialmente propenso a la saturación de corredores e intersecciones estratégicas.

Esta lectura contextual resulta indispensable para interpretar los resultados del diagnóstico vial, ya que permite entender que los problemas operativos observados en el tránsito no son hechos aislados, sino manifestaciones concretas de una organización territorial y funcional de la ciudad. Sobre esta base se justifica el análisis del capítulo siguiente y se fortalece la pertinencia de las propuestas de movilidad sostenible desarrolladas posteriormente.

CAPÍTULO IV

Análisis de resultados y diagnóstico vial de la movilidad urbana en Tulancingo, Hidalgo.

4.1 Introducción

El presente capítulo expone los resultados del análisis del tránsito vehicular en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo, con el propósito de identificar las condiciones operativas actuales del sistema vial y los factores que inciden en la congestión vehicular. A partir de la información recabada mediante aforos vehiculares clasificados, observación en campo, análisis funcional de vialidades estratégicas y aplicación de encuestas, se evalúa el comportamiento del tránsito durante los periodos de mayor demanda.

Los resultados permiten identificar corredores con alta carga vehicular, intersecciones críticas y condiciones de operación compatibles con la saturación en determinados puntos de la red vial. Este análisis constituye la base técnica para la formulación de propuestas de movilidad sostenible, ya que permite comprender de manera objetiva la magnitud del problema, su localización espacial y los factores que lo generan.

En términos analíticos, este capítulo no se limita a presentar valores de tránsito o resultados aislados, sino que busca interpretar cómo las condiciones observadas en la red vial reflejan una relación más amplia entre estructura urbana, operación del sistema y comportamiento de la movilidad cotidiana. Por ello, los resultados se leen de manera integrada, considerando tanto la magnitud de la demanda vehicular como los factores de fricción operativa, la percepción social y la funcionalidad de los corredores estudiados.

Esta perspectiva permite entender que la congestión urbana en Tulancingo no se expresa únicamente en volúmenes elevados, sino también en la pérdida de regularidad del flujo, el aumento de las demoras, la baja competitividad del transporte público y la limitada capacidad del sistema para absorber de forma equilibrada los desplazamientos de la población.

4.2 Caracterización general del tránsito vehicular

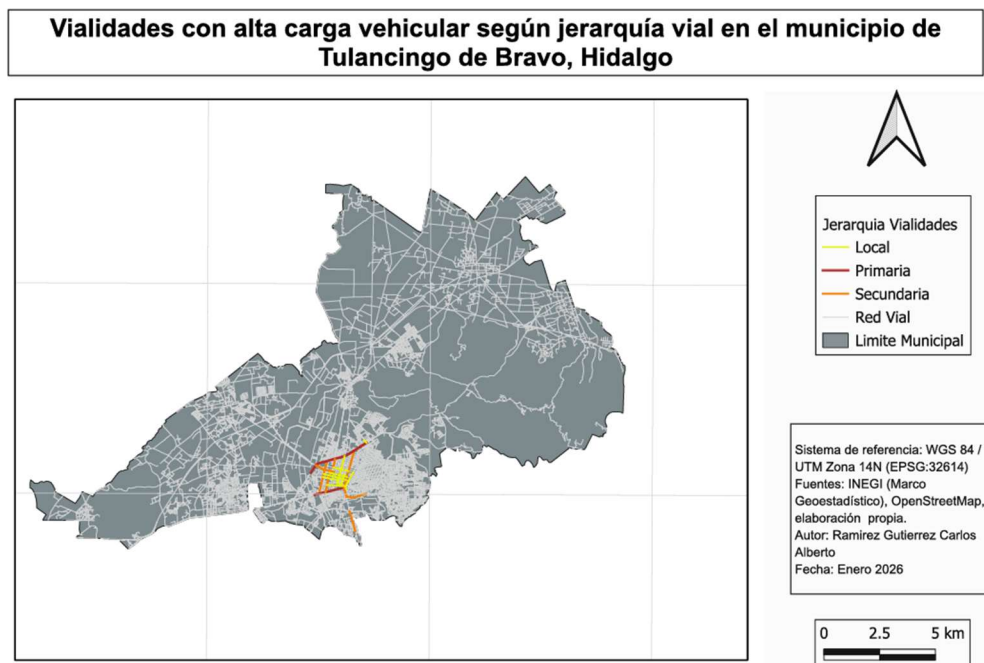
El sistema de movilidad de Tulancingo se caracteriza por una alta dependencia del vehículo particular, una red vial jerárquicamente limitada y una concentración de flujos en pocos corredores principales. Las vialidades de mayor jerarquía, como el Boulevard Emiliano

Zapata, el Boulevard Bicentenario y el Libramiento a Cuauhtémoc, cumplen funciones tanto urbanas como de conexión intermunicipal, lo que incrementa la presión sobre su capacidad operativa.

El tránsito vehicular presenta un comportamiento diferenciado entre los periodos pico matutino y vespertino, siendo este último el de mayor demanda. Asimismo, se observa una mezcla de tránsito local y de paso, especialmente en los libramientos, lo que genera fricción vehicular adicional. La coexistencia de vehículos ligeros, transporte público, motocicletas y unidades de carga en secciones viales con limitaciones geométricas constituye una de las principales características del tránsito en el municipio y contribuye a la pérdida de eficiencia operativa del sistema vial.

Desde una lectura operativa, esta configuración evidencia un sistema vial con fuerte dependencia de pocos ejes estructurantes, donde la mezcla de funciones urbanas y regionales incrementa la vulnerabilidad de la red ante variaciones de demanda. La coexistencia de viajes internos, flujos intermunicipales y maniobras asociadas al transporte público genera una condición de fricción permanente que reduce la eficiencia de la circulación incluso antes de alcanzar escenarios de sobresaturación total.

En este contexto, la caracterización del tránsito no debe entenderse únicamente como una descripción de volúmenes, sino como la identificación de un patrón de movilidad concentrado y poco diversificado, en el que la escasa conectividad transversal y la limitada oferta de alternativas modales refuerzan la presión sobre las vialidades principales.



Mapa 5. Vialidades con alta carga vehicular según la jerarquía vial en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo.

Fuente: elaboración propia con base en el análisis vial (2025).

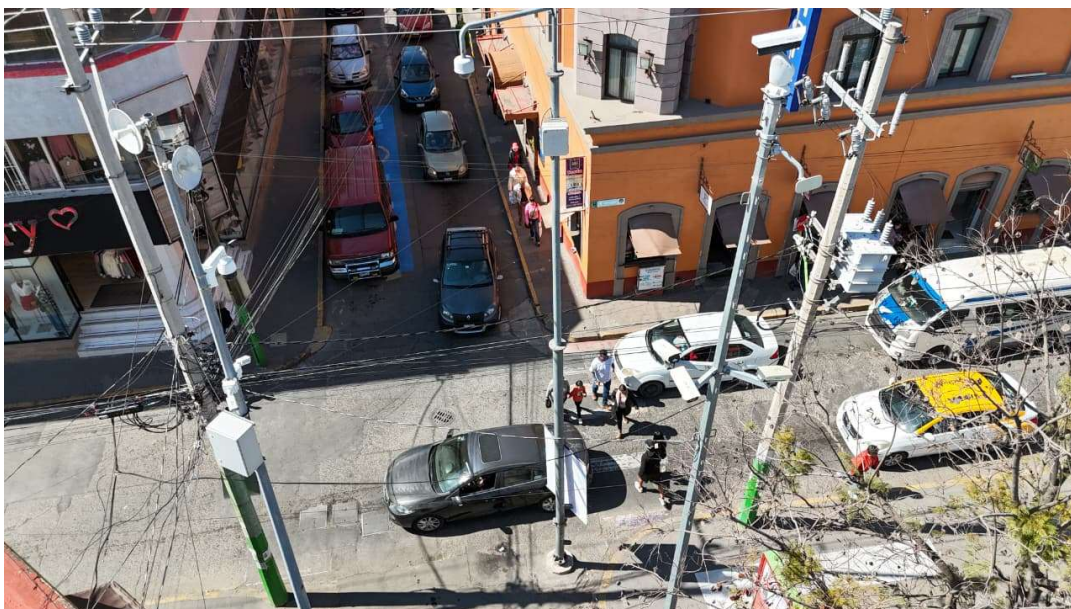


Ilustración 15. Congestión vehicular en la calle Benito Juárez, Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).



Ilustración 16. Congestión vehicular en el Boulevard Emiliano Zapata, Tulancingo, Hidalgo.
Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).

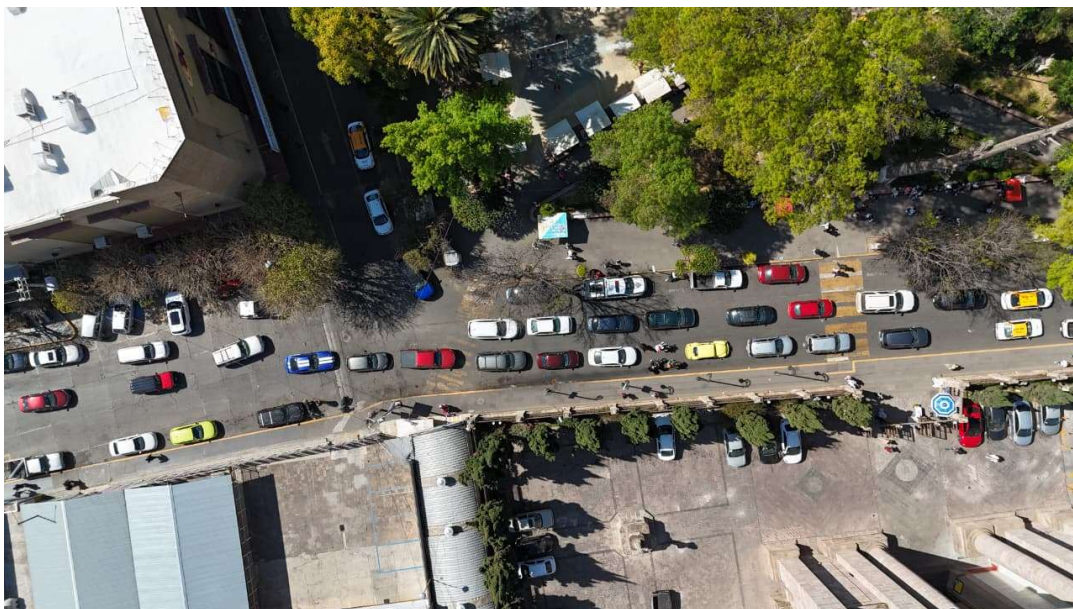


Ilustración 17. Congestión vehicular en la calle Manuel Fernando Soto, en Tulancingo, Hidalgo.
Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).

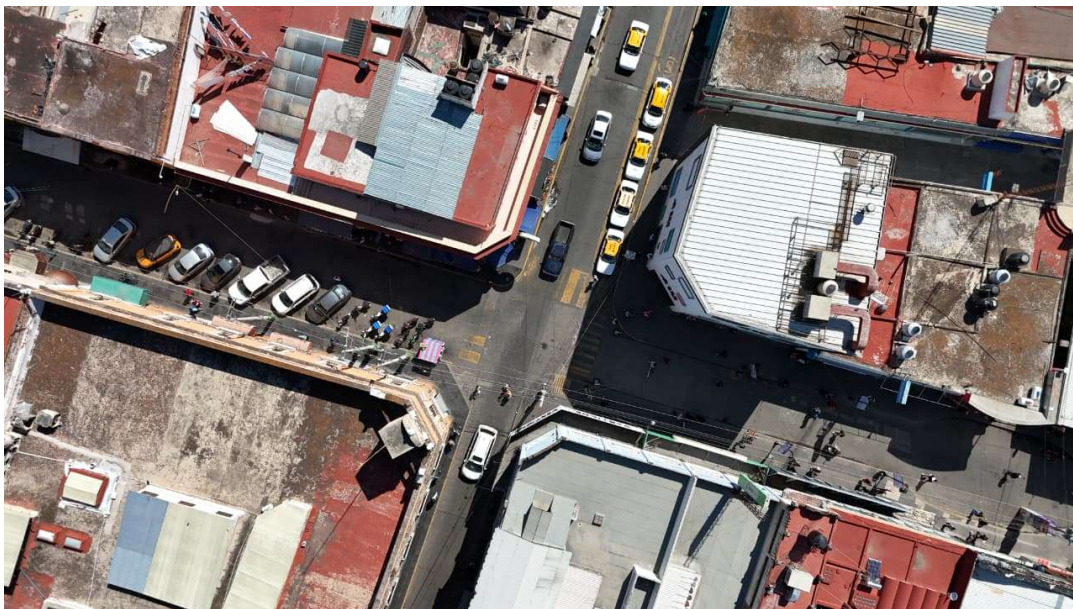


Ilustración 18. Condiciones de tráfico en la calle Manuel Fernando Soto durante la hora pico.

Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez (2025).

4.3 Resultados de los aforos vehiculares

Los aforos vehiculares clasificados se realizaron de forma bidireccional y en intersección completa durante un día hábil representativo, en los horarios de 07:00 a 09:00 horas y 16:00 a 18:00 horas, en los siguientes puntos estratégicos:

1. Boulevard Emiliano Zapata con Calle 21 de Marzo
2. Boulevard Bicentenario con Avenida Tomás Alva Edison
3. Libramiento a Cuauhtémoc con Calle Primero de Abril

Los resultados muestran que los volúmenes de tránsito en hora pico se sitúan en un rango de 3,307 a 6,006 vehículos por hora, lo que confirma una presión operativa importante sobre la red vial principal del municipio.

Este rango de volúmenes confirma que la red vial principal del municipio opera bajo una demanda concentrada y espacialmente selectiva, donde ciertos nodos absorben una proporción muy alta de los desplazamientos urbanos. La diferencia entre el valor máximo registrado en Boulevard Emiliano Zapata – 21 de Marzo y los volúmenes observados en las otras dos intersecciones también indica que la congestión no se distribuye de manera

homogénea, sino que se intensifica en puntos donde convergen funciones urbanas, tránsito regional y conflictos operativos.

Desde el punto de vista del análisis de tránsito, estos resultados sugieren que el problema no radica exclusivamente en el tamaño de la red vial, sino en la forma en que la demanda se canaliza sobre ciertos corredores e intersecciones con limitada capacidad de absorción y baja flexibilidad operativa.

Las tablas completas de conteo vehicular por intervalos de 15 minutos para cada punto de aforo se presentan en los anexos del documento.

Los volúmenes de tránsito se presentan en vehículos por hora (veh/h), sin convertirlos a unidades equivalentes de automóvil de pasajeros (PCU), a fin de mantener la consistencia en la interpretación de los resultados.

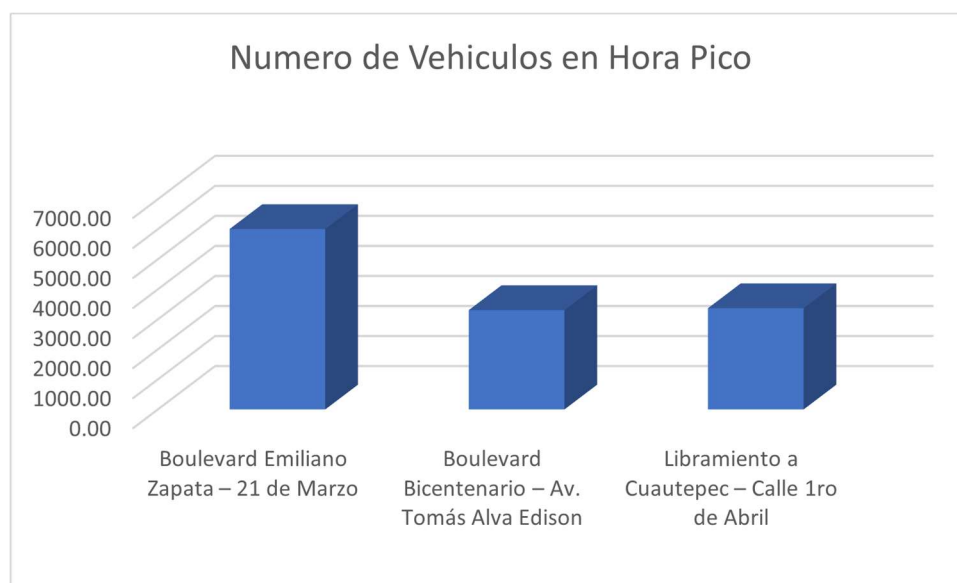


Gráfico 1. Volumen vehicular en hora pico (veh/h) en las intersecciones analizadas de Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: elaboración propia con base en los aforos vehiculares (2025).

El aforo vehicular en el cruce del Boulevard Emiliano Zapata con 21 de Marzo registró un volumen promedio total de 6,006 vehículos por hora, consolidándose como la intersección con mayor demanda entre los puntos analizados.

El tránsito estuvo dominado por el vehículo ligero, con 3,444 unidades, equivalente a aproximadamente 57.3 % del total. Destaca también una participación significativa de vehículos de carga, con 1,152 unidades (19.2 %), y transporte público, con 725.25 unidades (12.1 %). La presencia de motocicletas, con 560.25 unidades (9.3 %), confirma la coexistencia de distintos modos en un espacio vial altamente exigido.

A partir de estos volúmenes y de una capacidad de referencia para las intersecciones urbanas principales, este cruce presenta una relación V/C estimada de 1.33, lo que indica sobresaturación operativa y condiciones compatibles con un nivel de servicio E–F durante los periodos de mayor demanda.

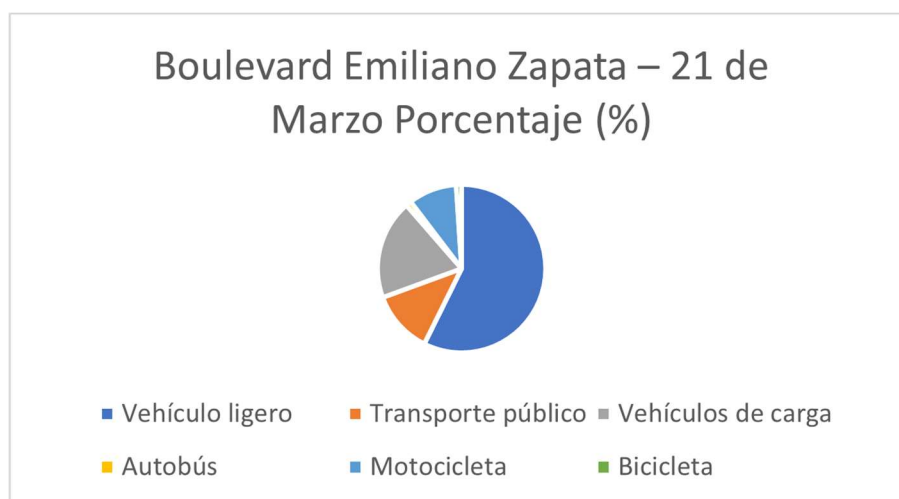


Gráfico 2. Composición del tránsito vehicular por tipo de vehículo en la intersección Boulevard Emiliano Zapata – 21 de Marzo (veh/h).

Fuente: elaboración propia con base en los aforos vehiculares (2025).

En la intersección del Boulevard Bicentenario con la Avenida Tomás Alva Edison se registró un volumen total promedio de 3,307 vehículos por hora, correspondiente a un nivel de demanda intermedio. El vehículo ligero concentró la mayor proporción del tránsito con 2,035 unidades (61.5 %), seguido por los vehículos de carga con 526 unidades (15.9 %), el transporte público con 330.5 unidades (10.0 %) y las motocicletas con 327.5 unidades (9.9 %).

Las categorías restantes, correspondientes principalmente a autobuses y bicicletas, representaron el porcentaje residual del flujo total.

Este comportamiento es consistente con el carácter urbano-comercial del corredor, donde la congestión se asocia principalmente a la concentración de actividades y a los accesos laterales. Su relación V/C estimada es de 0.73, lo que sugiere condiciones de operación cercanas a la estabilidad, aunque sensibles a perturbaciones operativas.

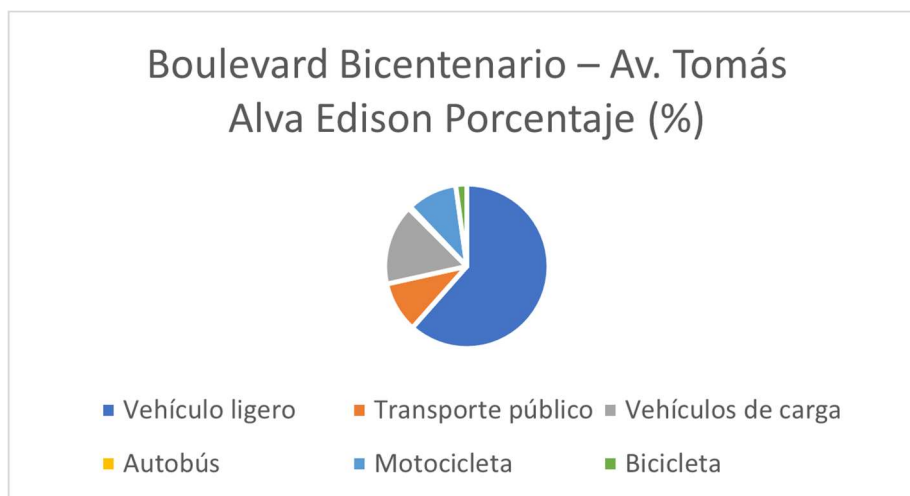


Gráfico 3. Composición del tránsito vehicular por tipo de vehículo en la intersección Boulevard Bicentenario – Avenida Tomás Alva Edison (veh/h).

Fuente: elaboración propia con base en los aforos vehiculares (2025).

Por su parte, el aforo realizado en el Libramiento a Cuauhtepc con Calle Primero de Abril arrojó un volumen total promedio de 3,370 vehículos por hora. El vehículo ligero representó 2,207 unidades (65.5 %), mientras que los vehículos de carga registraron 535.25 unidades (15.9 %) y el transporte público 305.50 unidades (9.1 %).

Las categorías restantes, integradas por autobuses y bicicletas, representaron el porcentaje residual del tránsito total observado.

Esta composición confirma la función del libramiento como corredor de conexión interurbana, en el que la presencia de tránsito pesado influye significativamente en la operación vial. En este punto, la relación V/C estimada fue de 0.75, lo que refleja una condición operativa exigente, aunque aún por debajo del umbral de sobresaturación.

En conjunto, los aforos evidencian que el municipio presenta condiciones de alta demanda vehicular concentradas en pocos corredores, con un punto crítico en el Boulevard Emiliano Zapata y dos intersecciones adicionales con carga relevante y vulnerabilidad operativa.

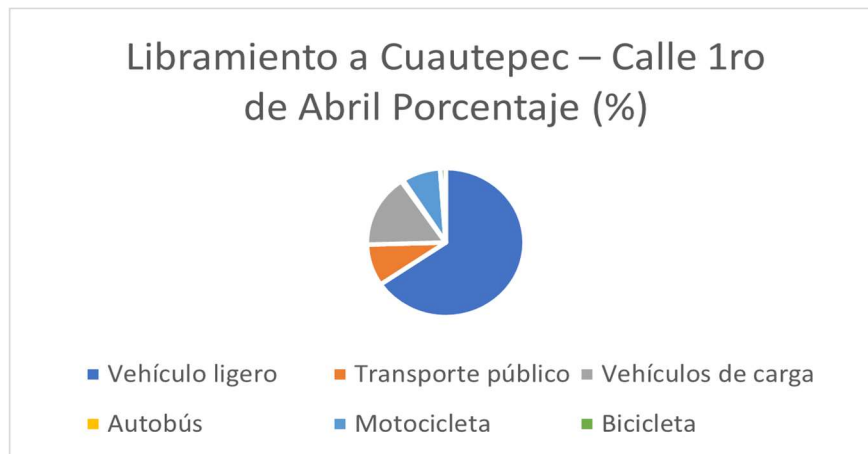


Gráfico 4. Composición del tránsito vehicular por tipo de vehículo en la intersección de Libramiento a Cuauhtémoc – Calle Primero de Abril (veh/h).

Fuente: elaboración propia con base en los aforos vehiculares (2025).

Los resultados evidencian una predominancia de vehículos ligeros en la composición del tránsito, lo que incrementa la presión sobre la infraestructura vial, al tratarse de un modo de transporte de baja eficiencia espacial. Asimismo, la presencia de transporte público que opera sin paradas definidas genera fricción operativa que reduce la capacidad efectiva de las intersecciones.

El porcentaje restante correspondió a autobuses, motocicletas y bicicletas, cuya participación fue menor pero operativamente relevante para la composición del flujo.

En conjunto, la información obtenida mediante los aforos permite confirmar la hipótesis de que la congestión vehicular en Tulancingo se concentra en un número reducido de puntos críticos, donde la combinación de alta demanda y fricción operativa genera condiciones compatibles con saturación o con operación altamente exigida. Esta evidencia constituye la base cuantitativa del diagnóstico y permite distinguir entre intersecciones con sobresaturación efectiva y nodos que, aun sin rebasar formalmente la capacidad, presentan elevada vulnerabilidad ante perturbaciones operativas.

4.4 Tiempos de recorrido y velocidades de operación

El análisis de los tiempos de recorrido y velocidades de operación evidenció una reducción significativa de la velocidad promedio durante los periodos pico, especialmente en los corredores principales. En vialidades como el Boulevard Emiliano Zapata y el Boulevard Bicentenario, las velocidades de operación se reducen considerablemente en horas de máxima demanda, lo que genera tiempos de traslado elevados y condiciones de circulación inestables.

Estas disminuciones están asociadas principalmente a la saturación de intersecciones, a la falta de coordinación semafórica, a la presencia de accesos laterales no controlados y a las maniobras de ascenso y descenso del transporte público. Con base en la relación entre la demanda observada y la capacidad estimada, así como en los criterios del Highway Capacity Manual, se identifican demoras promedio cercanas a 80 s/veh y colas máximas de aproximadamente 120 m en los periodos críticos, particularmente en el cruce del Boulevard Emiliano Zapata con 21 de Marzo.

En los libramientos, aunque las velocidades son mayores fuera de los periodos pico, la presencia de tránsito pesado provoca desaceleraciones constantes, pérdida de uniformidad del flujo y reducción de la eficiencia operativa.

La reducción de velocidades observada durante los periodos pico confirma que la congestión no se manifiesta únicamente en la acumulación visible de vehículos, sino también en la pérdida progresiva de fluidez y en la disminución de la regularidad del desplazamiento. Desde esta perspectiva, el tiempo de recorrido se convierte en un indicador particularmente útil para valorar la eficiencia real del sistema, ya que integra el efecto combinado de la saturación, la fricción operativa y la discontinuidad del flujo.

En términos prácticos, velocidades de operación bajas y tiempos de recorrido elevados implican una pérdida de accesibilidad efectiva dentro de la ciudad, pues aumentan el costo temporal de los desplazamientos y deterioran la confiabilidad del sistema de movilidad tanto para usuarios del automóvil como para usuarios del transporte público.

4.5 Análisis de intersecciones críticas

El análisis de las intersecciones evaluadas permitió identificar puntos críticos de congestión, donde la demanda vehicular se aproxima o supera la capacidad disponible, lo cual es

compatible con LOS E–F. La intersección del Boulevard Emiliano Zapata con 21 de Marzo presenta elevados volúmenes de entrada, múltiples movimientos conflictivos y la ausencia de una regulación semafórica suficientemente eficiente, lo que genera largas colas y retrasos significativos.

Su volumen de 6,006 veh/h y su V/C estimado de 1.33 la consolidan como el punto más crítico de la muestra. La condición de sobresaturación observada se asocia a la convergencia de flujos provenientes de distintos corredores urbanos, así como a la interferencia generada por las maniobras de ascenso y descenso del transporte público en zonas no reguladas. Esto provoca interrupciones en el flujo continuo y incrementa la demora y la longitud de la cola.

En el Boulevard Bicentenario con Avenida Tomás Alva Edison, la geometría vial y la alta interacción entre los flujos vehiculares y las actividades urbanas incrementan los conflictos, particularmente en el periodo vespertino. Aunque su V/C estimado de 0.73 no refleja sobresaturación estructural, sí muestra una operación vulnerable a interferencias por accesos laterales, maniobras de giro y fricción con el entorno urbano.

Finalmente, el Libramiento a Cuauhtepac con Calle Primero de Abril presenta problemas asociados a la mezcla de tránsito local e interurbano, así como a la presencia de unidades de carga que afectan la capacidad, la regularidad del flujo y la seguridad vial. Su V/C estimado de 0.75 indica una condición operativa cercana al límite funcional en periodos de máxima demanda.

En conjunto, las tres intersecciones analizadas presentan relaciones V/C en un rango de 0.73 a 1.33, lo que evidencia desde una operación exigente hasta la sobresaturación, con afectaciones directas en la calidad del servicio vial.

El análisis comparado de estas intersecciones permite observar que la severidad de la congestión depende no solo del volumen total de tránsito, sino también de la forma en que ese volumen interactúa con la geometría del cruce, la mezcla modal y el control operativo disponible. En otras palabras, una intersección puede mostrar una operación vulnerable aun sin encontrarse formalmente sobresaturada, si concentra maniobras de giro, accesos laterales, transporte público sin control y cruces peatonales conflictivos.

Esta lectura resulta especialmente importante para la formulación de propuestas, ya que indica que la mejora del desempeño no depende exclusivamente de incrementar capacidad física, sino de intervenir sobre los puntos de conflicto que degradan la operación del sistema.



Ilustración 19. Intersección urbana con alta congestión vehicular en Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: El Universal Hidalgo.



Ilustración 20. Congestión vehicular en la calle Manuel Fernando Soto, en Tulancingo, Hidalgo.

Fuente: fotografía tomada por Carlos Alberto Ramírez Gutiérrez |(2025).

4.6 Factores que inciden en la congestión

Los factores identificados pueden agruparse en tres categorías: operativos, como paradas informales y giros conflictivos; geométricos, relacionados con la configuración de la intersección; y de demanda, asociados al volumen de tránsito. La interacción de estos factores reduce la capacidad efectiva de la infraestructura vial, lo que provoca saturación.

Asimismo, la limitada continuidad de la red vial, la insuficiente jerarquización de las vialidades y la falta de gestión del tránsito en intersecciones estratégicas contribuyen a que los volúmenes vehiculares se concentren en pocos corredores, superando o aproximándose a su capacidad operativa. A ello se suman factores operativos observados en campo, como paradas informales, maniobras frecuentes de ascenso y descenso, cruces peatonales no canalizados y giros conflictivos, que incrementan la fricción vehicular y agravan las demoras.

La identificación de estos factores permite entender que la congestión urbana en Tulancingo responde a una lógica acumulativa. Los problemas de demanda, geometría y operación no

actúan de manera aislada, sino que se refuerzan entre sí: una red con conectividad limitada concentra más tránsito en pocos corredores; esa concentración incrementa la exposición a maniobras conflictivas; y dichas maniobras reducen todavía más la capacidad efectiva del sistema.

Por ello, el abordaje técnico de la congestión requiere una lectura multicausal, donde la solución no se oriente únicamente a ampliar infraestructura, sino también a ordenar la operación del transporte público, mejorar la gestión de intersecciones y reducir los conflictos entre modos de movilidad.

4.7 Impactos de la congestión vehicular

La congestión vehicular en el municipio de Tulancingo genera impactos significativos en los ámbitos social, económico, ambiental y urbano, que afectan directamente la calidad de vida de la población. Desde la perspectiva social, el aumento de los tiempos de traslado incrementa los niveles de estrés y fatiga de los usuarios, reduce el tiempo disponible para actividades productivas y recreativas y deteriora la percepción de la accesibilidad urbana.

En el ámbito económico, la congestión vehicular provoca pérdidas asociadas al consumo excesivo de combustible, a mayores costos de operación de los vehículos y a la disminución de la productividad laboral. La saturación de los corredores estratégicos limita la eficiencia en el transporte de mercancías y servicios, afecta la competitividad del municipio y encarece las actividades comerciales y logísticas.

Desde el punto de vista ambiental, el tránsito congestionado incrementa las emisiones de contaminantes atmosféricos y de gases de efecto invernadero, lo que contribuye al deterioro de la calidad del aire. Las condiciones de arranque y parada frecuentes, propias de la congestión, elevan las emisiones por kilómetro recorrido y el consumo energético. Finalmente, en el plano urbano, la congestión reduce la eficiencia del espacio público, prioriza al automóvil sobre otros modos de transporte y limita el desarrollo de una movilidad más equitativa y sostenible.

Estos impactos deben interpretarse de forma integrada, ya que la congestión vehicular no produce efectos aislados, sino una cadena de consecuencias que retroalimentan los desequilibrios urbanos. El incremento en los tiempos de viaje reduce la productividad y la

calidad de vida; la mayor dependencia del automóvil incrementa emisiones y costos; y la pérdida de eficiencia del espacio vial dificulta la consolidación de formas de movilidad más sostenibles.

En este sentido, la congestión constituye no solo un problema de tránsito, sino también un factor que limita la competitividad urbana, profundiza desigualdades de acceso y deteriora la funcionalidad general de la ciudad.

4.8 Diagnóstico integral de la movilidad urbana

El diagnóstico integral de la movilidad urbana en Tulancingo evidencia un modelo de desplazamiento desequilibrado, caracterizado por una alta dependencia del automóvil privado y por una red vial con capacidad limitada para absorber la demanda creciente. El análisis de los aforos vehiculares, los tiempos de recorrido y las intersecciones críticas confirma que los principales corredores urbanos operan en condiciones de alta exigencia, e incluso de sobresaturación en casos específicos, durante las horas pico.

En términos agregados, el diagnóstico muestra: volúmenes de hora pico entre 3,307 y 6,006 veh/h, relaciones V/C estimadas entre 0.73 y 1.33, demoras promedio cercanas a 80 s/veh y colas máximas del orden de 120 m en los puntos más conflictivos. Estos indicadores evidencian que la congestión no se distribuye de manera homogénea, sino que se concentra en corredores e intersecciones donde convergen flujos urbanos y regionales, así como en actividades de alta atracción de viajeros.

La estructura urbana dispersa y la concentración de actividades en las áreas centrales obligan a la población a realizar desplazamientos diarios hacia los mismos puntos, lo que satura la infraestructura existente. El transporte público, aunque presente, opera con baja eficiencia y competitividad, lo que reduce su capacidad para absorber una mayor proporción de viajes. Paralelamente, la falta de infraestructura continua y segura para peatones y ciclistas limita la diversificación modal y refuerza el uso del automóvil como principal medio de transporte.

Este diagnóstico pone de manifiesto que la congestión vehicular no es un problema aislado del tránsito, sino el resultado de la interacción entre el crecimiento urbano, la planeación

territorial insuficiente, las deficiencias operativas del sistema vial y la ausencia de políticas integrales de movilidad.

Desde una perspectiva sistémica, el diagnóstico permite afirmar que Tulancingo opera bajo un modelo de movilidad con baja diversificación modal, fuerte concentración espacial de viajes y limitada capacidad de adaptación de la red vial. Esta combinación produce una ciudad donde la congestión no es un fenómeno excepcional, sino una condición recurrente asociada a la forma urbana y al funcionamiento operativo del sistema de transporte.

La relevancia de este diagnóstico radica en que permite pasar de una explicación centrada únicamente en el crecimiento del parque vehicular a una interpretación más compleja, donde la distribución territorial de actividades, la calidad del transporte público, la infraestructura peatonal y ciclista y la gestión del tránsito forman parte de un mismo problema urbano.

4.9 Limitaciones del estudio

El presente estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, los aforos vehiculares se realizaron en un día hábil representativo, lo que no permite capturar las variaciones semanales o estacionales del tránsito. Asimismo, la estimación de indicadores como demoras y niveles de servicio se basa en metodologías estandarizadas, sin recurrir a herramientas de simulación microscópica. Adicionalmente, las condiciones observadas corresponden a un periodo específico, por lo que cambios en la demanda o en la operación del transporte público podrían modificar el comportamiento del sistema vial. No obstante, los resultados obtenidos permiten identificar tendencias claras y fundamentar propuestas de intervención.

No obstante, estas limitaciones no invalidan el diagnóstico, sino que delimitan su alcance. El estudio permite establecer con claridad tendencias operativas, puntos críticos y relaciones consistentes entre estructura urbana, demanda de movilidad y desempeño vial, aunque deja abierta la posibilidad de profundizar en investigaciones futuras mediante campañas de aforo más extensas, modelación de escenarios y análisis de sensibilidad temporal.

En este sentido, la investigación constituye una base técnica inicial sólida para la toma de decisiones locales, aun cuando no pretenda agotar todas las dimensiones analíticas posibles del fenómeno.

4.10 Percepción ciudadana sobre el transporte público y la movilidad urbana

Con el propósito de complementar el diagnóstico técnico del tránsito vehicular y la congestión urbana en el municipio de Tulancingo, se aplicó un cuestionario estructurado a una muestra de 200 personas, orientado a conocer la percepción ciudadana sobre el transporte público, las condiciones de movilidad y las alternativas para mejorar la vialidad.

La incorporación de esta dimensión perceptual resulta especialmente relevante porque permite contrastar el diagnóstico técnico con la experiencia cotidiana de los usuarios. Mientras los aforos y los indicadores operativos muestran cómo funciona el sistema desde el punto de vista del tránsito, la encuesta permite identificar cómo ese funcionamiento es vivido por la población, particularmente en términos de calidad, seguridad, confiabilidad y disposición al cambio modal.

Los resultados evidencian que el uso del transporte público es una práctica frecuente entre la población. Del total de encuestados, 30.5 % señaló utilizarlo todos los días y 26.5 % indicó hacerlo varias veces a la semana, lo que significa que 57.0 % mantiene un uso regular del sistema. Sin embargo, la calidad del servicio es percibida de manera predominantemente desfavorable: 33.0 % lo calificó como regular, 32.0 % como malo y 12.5 % como muy malo, es decir, 77.5 % lo evalúa entre regular y muy malo.

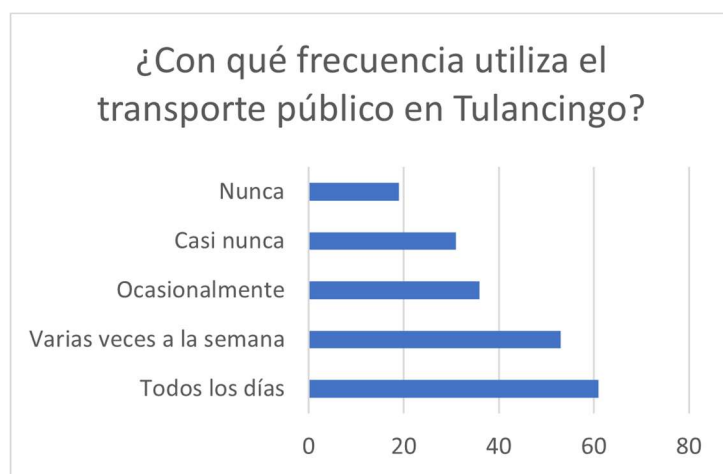


Gráfico 5. Frecuencia de uso del transporte público en la muestra encuestada en Tulancingo, Hidalgo (n = 200).

Fuente: elaboración propia.

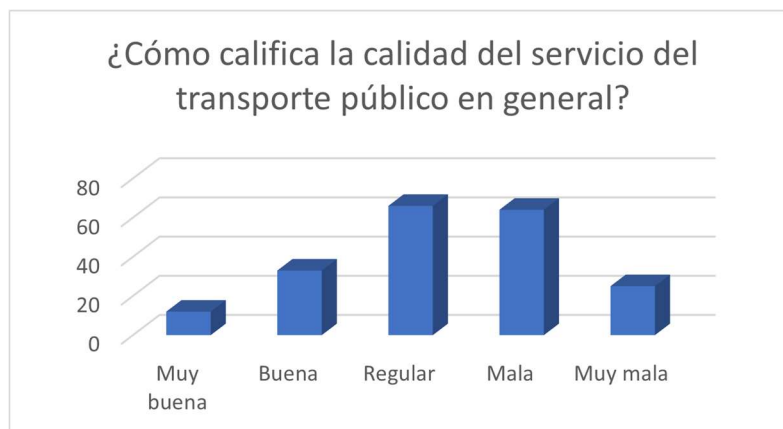


Gráfico 6. Percepción de la calidad del servicio de transporte público en Tulancingo, Hidalgo (n = 200).

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a los principales problemas del transporte público, los encuestados identificaron como factores más relevantes los retrasos y tiempos de espera largos (26.0 %), la falta de rutas eficientes (25.5 %) y el mal estado de las unidades (23.0 %). Estos resultados coinciden con las deficiencias operativas identificadas en el análisis técnico del sistema de movilidad.

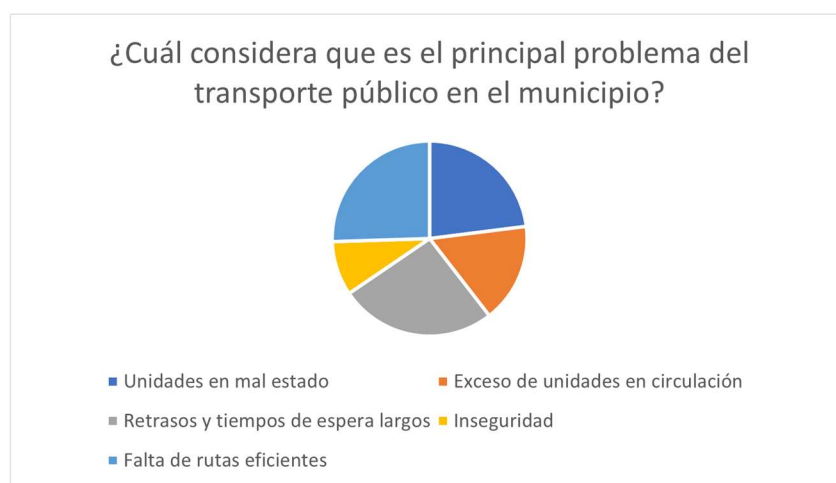


Gráfico 7. Principales problemas del transporte público identificados por los usuarios en Tulancingo, Hidalgo (n = 200).

Fuente: elaboración propia.

Respecto a la competitividad frente al automóvil particular, 40.5 % consideró que el transporte público es menos competitivo y 26.5 % que es mucho menos competitivo, por lo que 67.0 % de la muestra lo percibe en desventaja frente al automóvil. Esta percepción ayuda a explicar la persistente dependencia del vehículo privado en los desplazamientos cotidianos.



Gráfico 8. Percepción de competitividad del transporte público frente al automóvil particular en Tulancingo, Hidalgo (n = 200).

Fuente: elaboración propia.

En relación con el modo de transporte utilizado con mayor frecuencia, el 47.0 % de los encuestados señaló al transporte público como su medio principal de desplazamiento, mientras que el 28.5 % indicó usar principalmente el automóvil particular. Aunque el transporte público mantiene una participación importante, la percepción negativa de su calidad reduce su capacidad para competir eficazmente con el automóvil.

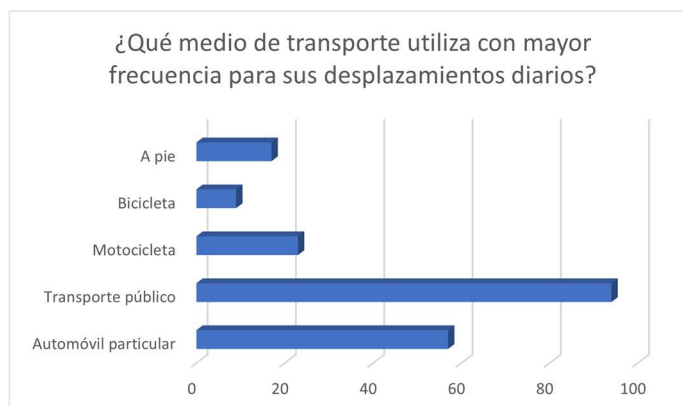


Gráfico 9. Medio de transporte más utilizado por la muestra encuestada en Tulancingo, Hidalgo (n = 200).

Fuente: elaboración propia.

La congestión vehicular se identificó como un problema que afecta directamente la calidad de vida de la población. El 35.0 % de los encuestados indicó que la congestión la afecta de manera muy significativa y el 29.5 % señaló una afectación moderada, lo que significa que el 64.5 % reconoce impactos claros en su vida cotidiana.

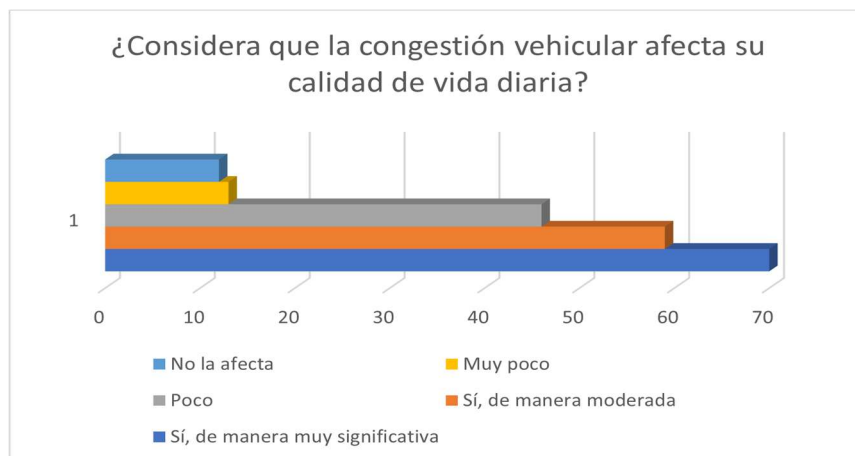


Gráfico 10. Percepción del impacto de la congestión vehicular sobre la calidad de vida en la muestra encuestada en Tulancingo, Hidalgo (n = 200).

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a las acciones más efectivas para reducir la congestión, la opción más respaldada fue una combinación de todas las anteriores, con 40.5 % de las respuestas, seguida de mejorar y modernizar el transporte público con 25.0 % y de optimizar la semaforización y la gestión del tránsito con 14.0 %. Esto refleja una preferencia social por soluciones integrales más que por medidas aisladas.

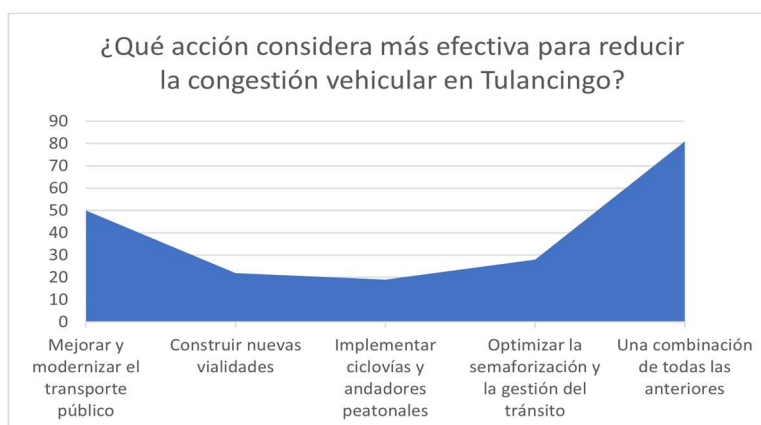


Gráfico 11. Acciones consideradas más efectivas para reducir la congestión vehicular por la muestra encuestada en Tulancingo, Hidalgo (n = 200).

Fuente: elaboración propia.

Asimismo, 33.5 % manifestó que definitivamente reduciría el uso del automóvil si existiera un transporte público más eficiente y confiable, y 32.0 % respondió que probablemente sí, lo que representa un 65.5 % de disposición favorable al cambio modal.

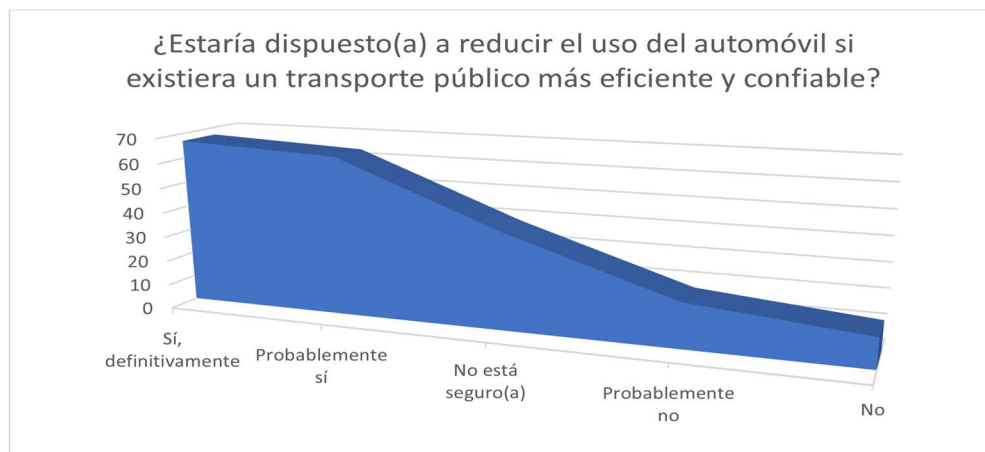


Gráfico 12. Disposición de la muestra encuestada a reducir el uso del automóvil si se mejora el transporte público en Tulancingo, Hidalgo (n = 200).

Fuente: elaboración propia.

La percepción sobre la seguridad de los desplazamientos a pie o en bicicleta también resulta crítica. Solo 2.5 % consideró que desplazarse en estos modos es muy seguro y 13.0 % lo calificó como seguro, mientras que 29.5 % lo consideró poco seguro, 35.5 % inseguro y 19.5 % muy inseguro. En conjunto, 84.5 % percibe la movilidad activa entre poco segura y muy insegura, lo que explica la baja participación de estos modos en la estructura de viajes.

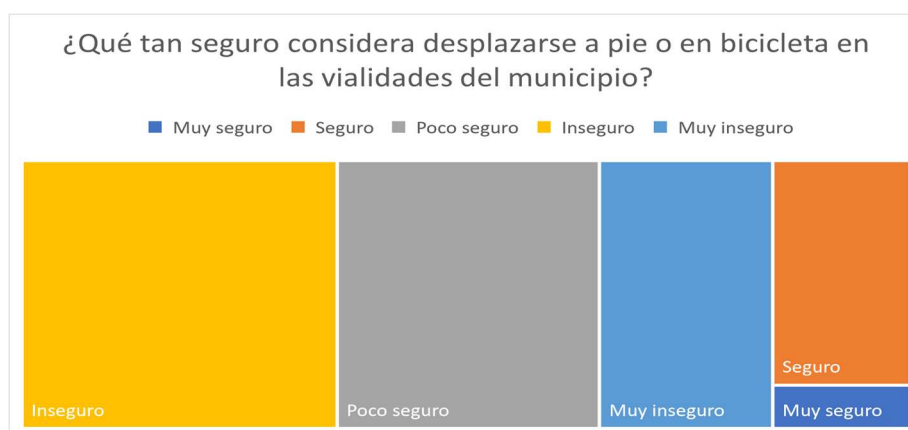


Gráfico 13. Percepción de seguridad al desplazarse a pie o en bicicleta en la muestra encuestada en Tulancingo, Hidalgo (n = 200).

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, al preguntar qué debería priorizar el gobierno municipal para mejorar la movilidad urbana, las respuestas se concentraron en la planeación integral de la movilidad (26.5 %), el transporte público de calidad (24.5 %) y el ordenamiento y control del tránsito (24.5 %). Estos resultados refuerzan la necesidad de formular propuestas que no se limiten a la infraestructura vial, sino que integren la gestión, el transporte público y la movilidad activa.

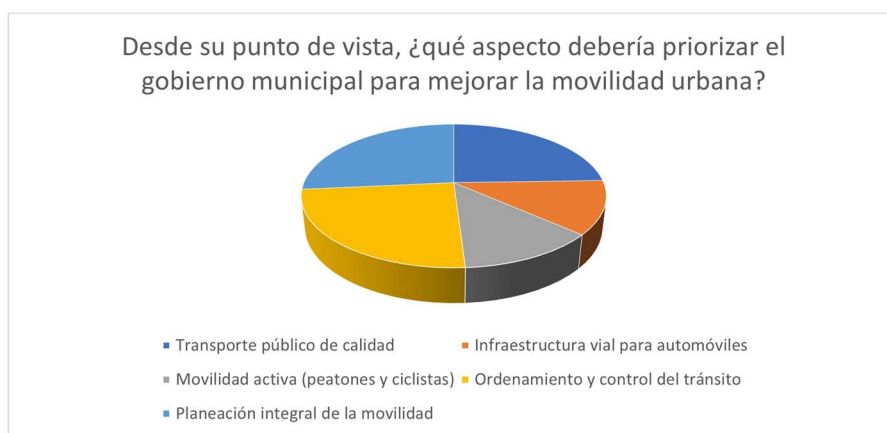


Gráfico 14. Prioridades identificadas por la muestra encuestada para mejorar la movilidad urbana en Tulancingo, Hidalgo (n = 200).

Fuente: elaboración propia.

En conjunto, los resultados de la encuesta confirman que la congestión vehicular y la movilidad urbana en Tulancingo constituyen una problemática ampliamente reconocida por la ciudadanía. La percepción social coincide con los hallazgos técnicos del diagnóstico, lo que evidencia la necesidad de implementar políticas integrales de movilidad que atiendan tanto la eficiencia operativa del sistema vial como la calidad del transporte público y la seguridad de los modos alternativos.

En términos analíticos, la encuesta confirma que la congestión vehicular en Tulancingo no es percibida como un problema aislado de circulación, sino como parte de un sistema de movilidad deficiente, en el que la baja calidad del transporte público y la inseguridad para caminar o andar en bicicleta limitan la posibilidad de reducir la dependencia del automóvil.

4.11 Discusión

En términos metodológicos, el estudio ofrece un diagnóstico sólido para una tesis de licenciatura o de posgrado aplicada, aunque presenta limitaciones que deben reconocerse para no exagerar el alcance de los resultados. El levantamiento en un día hábil representativo permite identificar tendencias claras y puntos críticos, pero no sustituye a campañas de aforo de mayor duración ni a simulaciones microscópicas multi-escenario. Asimismo, la encuesta aporta evidencia social valiosa, aunque su carácter no probabilístico impide extrapolar los resultados a toda la población municipal con una pretensión de inferencia estricta. Aun con estas limitaciones, la triangulación entre aforos, observación de campo, encuesta y análisis territorial brinda una base suficientemente robusta para sustentar propuestas de intervención gradual y técnicamente justificadas.

Las propuestas planteadas en el capítulo V son compatibles con la evidencia reciente en la literatura sobre la mitigación de la congestión en contextos urbanos intermedios. La semaforización de nodos conflictivos, la coordinación de intersecciones y la canalización peatonal responden a una lógica de gestión del tránsito de bajo y mediano costo, consistente con lo documentado por Anupriya et al. (2023), Papadakis et al. (2024) y Hansel (2025), quienes advierten que ampliar la capacidad vial rara vez resuelve por sí sola los problemas estructurales de movilidad. No obstante, la apertura de nuevas conexiones viales debe interpretarse con cautela: su conveniencia depende de que actúe como redistribución razonada de flujos y no como incentivo adicional al uso del automóvil. Por ello, dichas medidas solo resultan defendibles si se implementan junto con el fortalecimiento del transporte público, la seguridad peatonal y la red ciclista continua.

En materia de movilidad activa, la percepción de inseguridad al caminar o pedalear es consistente con la literatura especializada sobre la continuidad de la red, el tratamiento de las intersecciones y la seguridad subjetiva. La tesis documentó que la infraestructura peatonal y ciclista presenta discontinuidades y baja legibilidad funcional, lo que reduce su capacidad para captar los viajes cotidianos. Este resultado coincide con Nazemi et al. (2021), Fitch et al. (2022), Gössling & McRae (2022) y Friel et al. (2023), quienes muestran que la adopción de modos activos depende en gran medida de la continuidad, la separación respecto al tránsito motorizado y la resolución segura de cruces. En consecuencia, la propuesta ciclista del estudio resulta técnicamente pertinente solo en la medida en que se implemente como red conectada y no como tramos aislados.

La evidencia social obtenida mediante una encuesta fortaleció el diagnóstico técnico. La baja calificación del transporte público y su menor competitividad frente al automóvil sugieren que la congestión no puede mitigarse únicamente mediante el control semafórico o ajustes geométricos, ya que también existen problemas de calidad percibida, confiabilidad y atractivo modal. Este hallazgo coincide con estudios recientes que identifican el tiempo de espera, la regularidad, el confort y la accesibilidad como determinantes centrales de la elección modal (Witchayaphong et al., 2020; Abdullah et al., 2021a, 2021b, 2022; Zhang et al., 2023). Por ello, la persistencia del uso del automóvil en Tulancingo no debe interpretarse únicamente como una preferencia cultural, sino también como una respuesta racional ante un sistema colectivo percibido como insuficiente.

Desde la perspectiva operativa, el cruce Boulevard Emiliano Zapata–21 de Marzo destacó por registrar la condición más crítica, con volúmenes de tránsito del orden de 6,006 veh/h y una relación V/C estimada de 1.33. Este resultado es consistente con los planteamientos del Highway Capacity Manual respecto a las condiciones de sobresaturación y la pérdida progresiva de estabilidad del flujo en intersecciones urbanas (Transportation Research Board, 2022). Sin embargo, el análisis de campo permitió observar que la pérdida de desempeño no se debe solo a la demanda total, sino también a la fricción operativa generada por paradas informales, maniobras de ascenso y descenso, giros conflictivos y cruces peatonales sin canalización. Esta lectura coincide con lo señalado por Papadakis et al. (2024) y Carboni & Coskun (2025), quienes subrayan que la gestión del tránsito y el control de conflictos locales pueden generar mejoras sustantivas aun cuando no se amplíe físicamente la sección vial.

Los resultados obtenidos confirman que la congestión vehicular en Tulancingo no responde únicamente al aumento del parque vehicular, sino a la combinación de la estructura urbana, la concentración funcional de actividades, la fricción operativa y la baja competitividad del transporte público. Esta interpretación coincide con la literatura reciente sobre ciudades intermedias, que advierte que la saturación vial surge cuando la forma urbana y la localización de los equipamientos concentran los viajes en pocos corredores, mientras la red y la oferta modal no evolucionan con la misma rapidez (Arellana et al., 2020; Attard et al., 2023; Giesen et al., 2025). En ese sentido, el caso de Tulancingo se alinea con estudios que muestran que la congestión debe entenderse como un fenómeno sistémico y no como una simple insuficiencia geométrica de la infraestructura.

En conjunto, la discusión muestra que el caso de Tulancingo comparte rasgos con otras ciudades intermedias donde la congestión no se explica únicamente por el crecimiento del parque vehicular, sino por la combinación de estructura urbana concentrada, transporte público poco competitivo y red vial con baja capacidad de adaptación operativa. Esto refuerza la pertinencia de proponer intervenciones integrales y escalables, capaces de atender simultáneamente la gestión del tránsito, la seguridad vial y la diversificación modal.

La principal aportación analítica del capítulo radica en mostrar que la congestión observada en el municipio no debe interpretarse como una anomalía puntual, sino como el resultado previsible de un modelo de movilidad urbana que ha crecido sin una articulación suficiente entre planeación territorial, operación vial y prioridades de sostenibilidad.

4.12 Conclusiones parciales

El análisis del tránsito vehicular en Tulancingo permitió identificar con claridad los principales factores que explican la congestión urbana y sus efectos en el funcionamiento del sistema de movilidad.

Los resultados de los aforos vehiculares confirmaron la existencia de volúmenes elevados en corredores estratégicos, con una composición vehicular diversa que incrementa la fricción y reduce la capacidad operativa de las intersecciones. Destaca especialmente el cruce del Boulevard Emiliano Zapata con 21 de Marzo, donde se registró el mayor volumen de la muestra y se estimó una condición de sobresaturación.

Asimismo, los tiempos de recorrido y las velocidades de operación evidenciaron condiciones de saturación durante los periodos de mayor demanda, con demoras y colas compatibles con una operación deficiente en los puntos críticos. En conjunto, estos hallazgos confirman que la movilidad en Tulancingo requiere un enfoque integral, que combine la mejora de la infraestructura vial, la gestión del tránsito y la promoción de modos de transporte sostenibles.

Estas conclusiones parciales permiten sostener que la problemática de movilidad en Tulancingo presenta suficiente evidencia técnica y social para justificar la formulación de propuestas de intervención orientadas no solo a mejorar la operación de intersecciones específicas, sino también a fortalecer la sostenibilidad general del sistema de movilidad urbana. En consecuencia, el capítulo siguiente se enfoca en traducir este diagnóstico en acciones concretas, factibles y coherentes con la escala y condiciones del municipio.

CAPÍTULO V

PROPUESTA DE SOLUCIÓN

En esta sección se desarrollan en detalle las propuestas de solución para mejorar la movilidad urbana y reducir la congestión vehicular en la ciudad de Tulancingo, Hidalgo. Las intervenciones propuestas se formulan a partir del diagnóstico vial presentado en el capítulo anterior, en el que se identificaron corredores con alta carga vehicular, intersecciones críticas y conflictos recurrentes entre vehículos y peatones durante los periodos de mayor demanda.

Las propuestas planteadas no se limitan a los puntos donde se realizaron aforos vehiculares, sino que también consideran observaciones de campo, la concentración de actividades urbanas y los conflictos operativos detectados en corredores estratégicos del municipio, en particular en el centro histórico de la ciudad.

Las alternativas planteadas se diseñaron bajo criterios de jerarquía vial, seguridad vial, accesibilidad universal y prioridad de los usuarios vulnerables, en concordancia con lo establecido en la Ley General de Movilidad y Seguridad Vial y con los lineamientos de diseño urbano contenidos en el Manual de Calles: Diseño vial para ciudades mexicanas (SEDATU, 2019a). La priorización de las intervenciones considera su impacto potencial en la reducción de demoras y conflictos viales, su factibilidad técnica y operativa, así como el costo relativo de implementación en el contexto urbano del municipio.

Las propuestas integran medidas de gestión del tránsito, mejoras operativas en intersecciones y estrategias orientadas a fortalecer la movilidad sostenible, con el objetivo de optimizar el funcionamiento del sistema vial existente sin depender exclusivamente de ampliaciones de infraestructura.

Las propuestas no se orientan a la ampliación de la capacidad vial mediante incremento de carriles, sino a la optimización del espacio existente, la mejora de la operación del tránsito y la incorporación de soluciones de movilidad sostenible que permitan reducir la presión vehicular sobre los corredores principales.

5.1 Integración de un semáforo en la intersección Miguel Hidalgo – Luis M. Ponce con operación en horas pico

La intersección de las calles Miguel Hidalgo y Luis M. Ponce constituye uno de los puntos de conflicto más relevantes del corredor vial que atraviesa la zona central de Tulancingo. En este cruce convergen flujos importantes de vehículos particulares, unidades de transporte público y peatones que realizan cruces frecuentes, lo que genera maniobras de incorporación riesgosas, tiempos de espera irregulares y episodios de congestión durante los periodos de mayor demanda.

A partir del diagnóstico vial realizado, se propone la instalación de un sistema semafórico con operación prioritaria durante las horas pico identificadas en el análisis de tránsito, comprendidas entre las 07:00 y las 09:00 horas, así como entre las 16:00 y las 18:00 horas. Durante estos intervalos, el controlador semafórico regulará los movimientos de ambos ejes, permitiendo una distribución más equilibrada de los tiempos de paso y reduciendo los conflictos laterales entre las corrientes vehiculares.

Fuera de estos horarios, el semáforo podrá operar en modo intermitente, permitiendo que el cruce funcione bajo la regla de tránsito 1x1, lo que evita introducir demoras innecesarias en periodos de baja demanda vehicular. El diseño de las fases semafóricas deberá contemplar una fase principal para el flujo longitudinal en la calle Miguel Hidalgo y una fase secundaria para los movimientos provenientes de la calle Luis M. Ponce. Asimismo, cuando los flujos peatonales lo justifiquen, se podrán incorporar fases peatonales protegidas que permitan realizar los cruces de forma segura.

De acuerdo con los lineamientos establecidos en el Manual de Calles (SEDATU, 2019a), la implementación de la semaforización en intersecciones urbanas debe considerar la seguridad de peatones y ciclistas, incorporando tiempos de cruce adecuados, señalización visible y condiciones de accesibilidad universal.

Con esta intervención se espera disminuir la congestión local, mejorar la seguridad vial y otorgar mayor previsibilidad a los tiempos de cruce, tanto para vehículos como para peatones, contribuyendo a una operación más ordenada del corredor vial.

5.2 Integración y sincronización de un semáforo en la intersección Miguel Hidalgo – Benito Juárez

La intersección de la calle Miguel Hidalgo con la calle Benito Juárez forma parte del mismo eje estructurante en el que se localiza el cruce con Luis M. Ponce. La implementación de un semáforo de manera aislada en uno de estos puntos podría generar efectos no deseados, como la acumulación de colas entre intersecciones o la formación de “olas rojas” que incrementen los tiempos de recorrido.

Por esta razón, se propone la instalación de un segundo semáforo en la intersección Miguel Hidalgo – Benito Juárez, concebido desde su origen como parte de un sistema coordinado con el semáforo propuesto en la intersección Miguel Hidalgo – Luis M. Ponce. La coordinación semafórica se basará en la definición de un tiempo de ciclo común y en el establecimiento de desfases temporales entre ambos controladores, con el propósito de generar una onda verde en el sentido de mayor demanda durante las horas pico.

Este tipo de operación permite que los vehículos que circulen a velocidad constante atraviesen ambas intersecciones con un número mínimo de detenciones, lo que reduce la formación de colas, el consumo de combustible y las emisiones contaminantes. Durante los periodos de mayor demanda ambos semáforos operarán bajo un plan coordinado, mientras que en horarios de menor flujo podrán operar en modo intermitente.

La coordinación semafórica es una estrategia ampliamente utilizada en la ingeniería de tránsito para mejorar la fluidez vehicular en corredores urbanos sin necesidad de ampliar la infraestructura vial existente. En este sentido, la intervención permitirá transformar el tramo de Miguel Hidalgo en un corredor vial gestionado, favoreciendo la continuidad del flujo vehicular y mejorando la seguridad en los cruces transversales.

Desde el punto de vista técnico, la implementación de control semafórico en estas intersecciones se justifica por la convergencia de flujos vehiculares con alta demanda y la presencia de conflictos operativos asociados a maniobras de giro, cruces peatonales y transporte público. De acuerdo con criterios del Highway Capacity Manual, la regulación semafórica permite asignar tiempos de paso de manera controlada, reducir puntos de conflicto y mejorar la distribución de los flujos.

Asimismo, la incorporación de fases semafóricas diferenciadas y la posible coordinación entre intersecciones contribuyen a disminuir las demoras promedio y a mejorar la progresión vehicular en corredores principales.

Adicionalmente, la incorporación de dispositivos de control debe considerar la seguridad de los usuarios vulnerables, integrando tiempos de cruce peatonal adecuados, señalización visible y elementos de accesibilidad universal, en concordancia con la Ley General de Movilidad y Seguridad Vial.

5.3 Instalación de un semáforo en la intersección Avenida Gilberto Gómez Carbajal – Libramiento Tulancingo–Santiago Tulantepec

La intersección entre la Avenida Gilberto Gómez Carbajal y el Libramiento Tulancingo–Santiago Tulantepec constituye un punto de conexión entre el tránsito urbano y el tránsito regional. En este nodo convergen flujos de vehículos particulares, de transporte público y de unidades de carga que circulan a velocidades distintas, lo que incrementa la probabilidad de conflictos viales y de maniobras peligrosas.

Se propone implementar un sistema semafórico de cuatro aproximaciones que permita ordenar los movimientos vehiculares y mejorar las condiciones de seguridad en la intersección. El esquema de operación deberá considerar fases diferenciadas para los movimientos rectos de ambos ejes y, en caso de que los volúmenes de tránsito lo requieran, fases protegidas para giros a la izquierda.

Dado que el libramiento presenta velocidades de operación superiores a las de las calles urbanas, la semaforización deberá complementarse con señalización preventiva, iluminación adecuada y elementos que favorezcan la reducción gradual de velocidad antes del cruce.

La operación del sistema se concentrará principalmente durante las horas pico identificadas en el diagnóstico vial, mientras que en periodos de baja demanda el semáforo podrá operar en modo intermitente. Con esta medida se busca ordenar los movimientos de cruce, disminuir los conflictos viales y mejorar la conectividad entre la red urbana y el libramiento.

5.4 Propuesta de implementación de semáforo peatonal en la intersección de la calle Manuel Fernando Soto con calle Miguel Hidalgo

La intersección entre las calles Manuel Fernando Soto y Miguel Hidalgo se localiza en el centro histórico de Tulancingo y presenta un alto flujo de peatones debido a la presencia de actividades comerciales, administrativas y de servicios. Actualmente, los cruces peatonales se realizan de manera continua y desordenada, lo que obliga a los vehículos a detenerse con frecuencia y reduce la velocidad de circulación.

Se propone la instalación de un semáforo peatonal con botón de demanda que permita concentrar los cruces en intervalos definidos. De esta manera, el flujo vehicular podrá operar de forma continua durante periodos más largos, reduciendo las detenciones imprevistas y mejorando la capacidad efectiva de la vialidad.

El diseño del ciclo semafórico deberá considerar tiempos suficientes para garantizar el cruce seguro de peatones, en particular de personas mayores o con movilidad reducida. Esta intervención responde a los principios de la Ley General de Movilidad y Seguridad Vial, que establece la prioridad de los peatones en el sistema de movilidad urbana. Además de mejorar la seguridad vial, la implementación de este dispositivo permitirá ordenar los flujos peatonales y reducir la congestión generada por las detenciones frecuentes del tránsito vehicular.

La incorporación de infraestructura y control peatonal responde a la necesidad de garantizar condiciones seguras para los usuarios más vulnerables del sistema vial. De acuerdo con el Manual de Calles, los cruces peatonales deben ser visibles, directos y seguros, evitando que el peatón se integre de manera conflictiva al flujo vehicular.

Además de mejorar la seguridad vial, estas intervenciones contribuyen a ordenar la operación del tránsito, al reducir detenciones imprevistas y conflictos en intersecciones con alta actividad peatonal.

Desde el punto de vista técnico, esta intervención también se justifica por las condiciones de saturación observadas en el diagnóstico vial. De acuerdo con los valores de relación V/C identificados, la semaforización permite mejorar la asignación de tiempos de paso y reducir los conflictos en intersecciones de alta demanda (Transportation Research Board, 2022).

5.5 Propuesta integral de red de ciclovías urbanas y metropolitanas en Tulancingo, Hidalgo

5.5.1 Descripción general de la propuesta

Con el objetivo de diversificar los modos de transporte, reducir la dependencia del automóvil y promover una movilidad urbana sostenible, se plantea la implementación de una red continua de ciclovías que articule equipamientos estratégicos, corredores urbanos existentes y zonas habitacionales de la ciudad de Tulancingo. La propuesta se concibe como un sistema integrado y no como tramos aislados, lo que permite desplazamientos seguros, eficientes y funcionales para viajes cotidianos de trabajo, estudio, salud y recreación.

La red propuesta está conformada por tres corredores ciclistas principales, que aprovechan la infraestructura existente y refuerzan la conectividad entre el Hospital General de Tulancingo, las ciclovías actuales y diversos ejes urbanos de alta demanda. En conjunto, la propuesta contempla 15.2 km de nueva infraestructura ciclista, diseñada bajo criterios de seguridad vial, continuidad, accesibilidad e integración urbana.

La propuesta de infraestructura ciclista se fundamenta en los principios del Manual de Calles (SEDATU, 2019a), que prioriza a los usuarios vulnerables y recomienda infraestructura segura, continua y conectada, especialmente en vialidades con altos volúmenes vehiculares y velocidades elevadas.

5.5.2 Ciclovía Hospital General de Tulancingo – conexión con ciclovía Calle a los Pinos / Carretera Tulancingo–Santiago

El primer corredor ciclista propuesto tiene una longitud aproximada de 6.0 km y se desarrolla a lo largo del eje que conecta el Hospital General de Tulancingo con la ciclovía existente ubicada en la intersección de la Calle a los Pinos con la Carretera Tulancingo–Santiago Tulantepec. El trazo se localiza en la orilla derecha del sentido de circulación Hospital General – ciclovía existente, aprovechando el derecho de vía disponible y minimizando las afectaciones a la calzada vehicular.

Desde el punto de vista funcional, este tramo cumple un papel estratégico, ya que conecta un equipamiento de salud de escala regional con zonas habitacionales y con infraestructura ciclista ya consolidada. Se propone una ciclovía bidireccional segregada, con un ancho

mínimo de 2.50 metros, ampliable hasta 3.00 metros en tramos con mayor demanda o cercanos a accesos institucionales.

La segregación respecto al tránsito vehicular se logrará mediante una franja de seguridad de al menos 0.50 metros, conformada por elementos físicos como guarniciones, delimitadores o camellones, considerando las velocidades de operación de la vialidad. Estas dimensiones se encuentran dentro de los rangos recomendados por el Manual de Calles (SEDATU, 2019a) para la infraestructura ciclista bidireccional en corredores urbanos.

El diseño del corredor deberá contemplar señalización horizontal y vertical específica para ciclistas, cruces seguros en accesos vehiculares, rampas suaves y pendientes longitudinales menores al 5 %, así como una iluminación adecuada que garantice condiciones seguras de circulación durante los horarios nocturnos. La cercanía al hospital justifica, además, la incorporación de cruces peatonales claramente señalizados y de zonas de transición en los puntos de mayor flujo de personas.

5.5.3 Ciclovía conexión Blvd. Bicentenario – Av. Gilberto Gómez Carbajal – Calle Plan de Ayala

El segundo corredor ciclista propuesto tiene una longitud aproximada de 2.0 km y conecta el tramo final de la ciclovía existente en el Boulevard Bicentenario con el entronque de la Avenida Gilberto Gómez Carbajal, y se extiende hasta la calle Plan de Ayala. Este segmento cumple una función clave de conectividad urbana, ya que permite enlazar la infraestructura ciclista existente con un eje vial de alta jerarquía y con zonas de actividad comercial y de servicios.

Dada la naturaleza urbana del entorno, se propone implementar una ciclovía bidireccional, segregada o semisegregada, según el ancho disponible en la sección vial. El ancho recomendado es de 2.50 metros, con delimitación mediante elementos prefabricados, pintura termoplástica y señalización vertical que garantice visibilidad y respeto por parte de los automovilistas.

En intersecciones y accesos laterales se deberán incorporar tratamientos de cruce ciclista, tales como marcas de color, señalización preventiva y elementos reductores de velocidad.

Este tipo de tratamiento permite mejorar la visibilidad del ciclista y reducir la probabilidad de conflictos con vehículos motorizados.

Este tramo resulta fundamental para cerrar discontinuidades en la red ciclista urbana y facilitar trayectos cortos dentro de la ciudad, favoreciendo la sustitución de viajes motorizados por desplazamientos en bicicleta, particularmente durante los periodos de mayor demanda.

5.5.4 Ciclovía Blvd. La Morena – Blvd. Circuito Chapultepec – Calle Allende

El tercer corredor ciclista propuesto corresponde a una longitud aproximada de 7.2 km, iniciando en la ciclovía existente del Boulevard La Morena, continuando hasta el entronque con el Boulevard Circuito Chapultepec y concluyendo en la calle Allende. Este tramo constituye el eje más extenso de la propuesta y tiene un carácter estructurante en el sistema de movilidad urbana.

Debido a su extensión y a la diversidad de contextos urbanos que atraviesa, se propone una ciclovía bidireccional continua con ancho mínimo de 2.50 metros, segregada físicamente del tránsito vehicular siempre que la sección vial lo permita. En zonas con restricciones de espacio se podrán emplear soluciones alternativas, como ciclovías a nivel de banqueta ampliada o carriles ciclistas protegidos.

Este corredor permitirá realizar viajes de media distancia dentro de la ciudad, reduciendo la presión vehicular sobre las vialidades paralelas y fortaleciendo la red de movilidad activa. Asimismo, su integración con las ciclovías existentes refuerza la continuidad del sistema y evita la fragmentación de la infraestructura ciclista, uno de los principales factores que desincentivan el uso de la bicicleta en las ciudades intermedias.

5.5.5 Justificación técnica, urbana y ambiental de la red propuesta

Desde el punto de vista técnico, la implementación de esta red de ciclovías resulta viable al aprovechar vialidades existentes y derechos de vía disponibles, sin requerir ampliaciones mayores de la calzada ni obras de gran complejidad. Las dimensiones propuestas cumplen con los criterios establecidos en guías nacionales e internacionales de diseño ciclista, garantizando condiciones adecuadas de seguridad y funcionalidad.

En el ámbito urbano, la red propuesta conecta equipamientos estratégicos, zonas habitacionales y corredores existentes, fortaleciendo la accesibilidad entre distintos sectores de la ciudad y reduciendo la dependencia del automóvil en trayectos cortos y medianos. La continuidad entre tramos evita interrupciones que suelen desincentivar el uso de la bicicleta y mejora la percepción de seguridad de los usuarios.

Desde la perspectiva ambiental y social, la infraestructura ciclista contribuye a reducir las emisiones contaminantes, a fomentar la actividad física y a mejorar la calidad de vida urbana. Al ofrecer una alternativa real y segura de desplazamiento, se promueve un cambio modal gradual y se disminuye la presión vehicular sobre la infraestructura vial existente.

Desde el punto de vista operativo, la implementación de infraestructura ciclista puede contribuir a la reducción de la demanda vehicular en viajes de corta y mediana distancia, lo que, en conjunto con medidas de gestión del tránsito, permite disminuir la presión sobre la red vial existente sin necesidad de ampliaciones significativas de capacidad.

5.5.6 Justificación económica y factibilidad institucional

Desde el punto de vista económico, la implementación de la red de ciclovías propuesta representa una alternativa de bajo costo relativo frente a soluciones tradicionales de movilidad, como la ampliación de vialidades o la construcción de pasos a desnivel.

Al aprovechar vialidades existentes y derechos de vía disponibles, las intervenciones se concentran principalmente en trabajos de adecuación superficial, señalización, delimitación física y mejora del pavimento, lo que reduce significativamente los costos de inversión inicial.

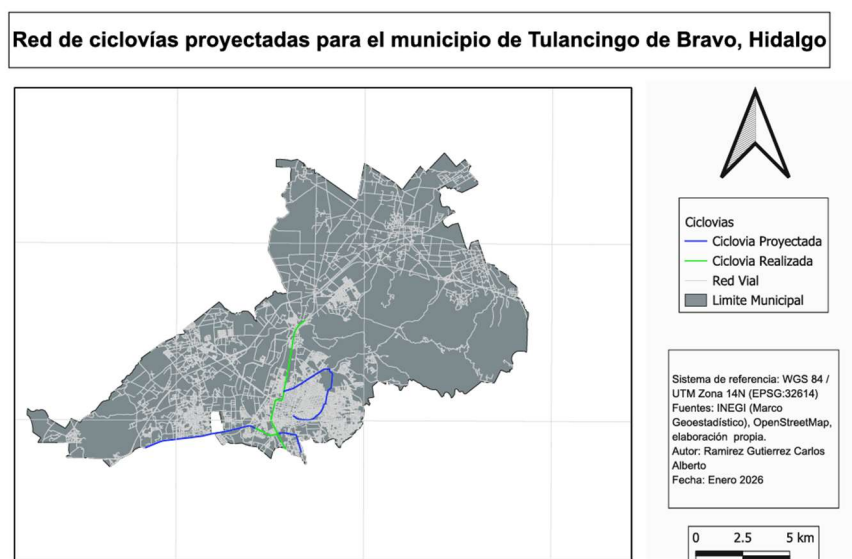
Diversos estudios y experiencias nacionales han demostrado que el costo de construcción de ciclovías urbanas segregadas es considerablemente menor que el de infraestructura vehicular tradicional, mientras que sus beneficios sociales, ambientales y económicos superan ampliamente la inversión realizada.

En el caso de Tulancingo, la ejecución gradual de los 15.2 km de ciclovías permitiría distribuir el gasto público en etapas, priorizando los tramos con mayor impacto social y demanda potencial, como el corredor del Hospital General y los enlaces con las ciclovías existentes.

En términos de factibilidad institucional, la propuesta resulta viable, ya que no requiere modificaciones profundas al marco normativo vigente ni la creación de nuevas entidades de gestión. Su implementación puede ser coordinada por el gobierno municipal, a través de las áreas de Obras Públicas, Desarrollo Urbano y Movilidad, con el apoyo del gobierno estatal.

Asimismo, la red ciclista es compatible con los lineamientos establecidos en el Plan Integral de Movilidad Urbana Sustentable (PIMUS Tulancingo, 2018) y con las políticas nacionales de movilidad promovidas por la SEDATU, lo que facilita el acceso a fuentes de financiamiento estatal y federal orientadas a proyectos de movilidad sostenible.

La ejecución escalonada de los tramos también permite realizar ajustes operativos con base en la respuesta de los usuarios, lo que fortalece la aceptación social del proyecto. Además, al tratarse de infraestructura visible y de impacto directo en la calidad de vida, la red de ciclovías puede generar legitimidad institucional y favorecer la continuidad de las políticas públicas de movilidad más allá de los periodos administrativos. En conjunto, la propuesta de red ciclista resulta económicamente eficiente, institucionalmente factible y socialmente rentable, y se consolida como una acción estratégica para avanzar hacia un modelo de movilidad urbana más sostenible en el municipio de Tulancingo.



Mapa 6. Red propuesta de ciclovías urbanas y metropolitanas en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo.

Fuente: elaboración propia.

5.6 Propuesta de apertura y habilitación de vialidad urbana en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo

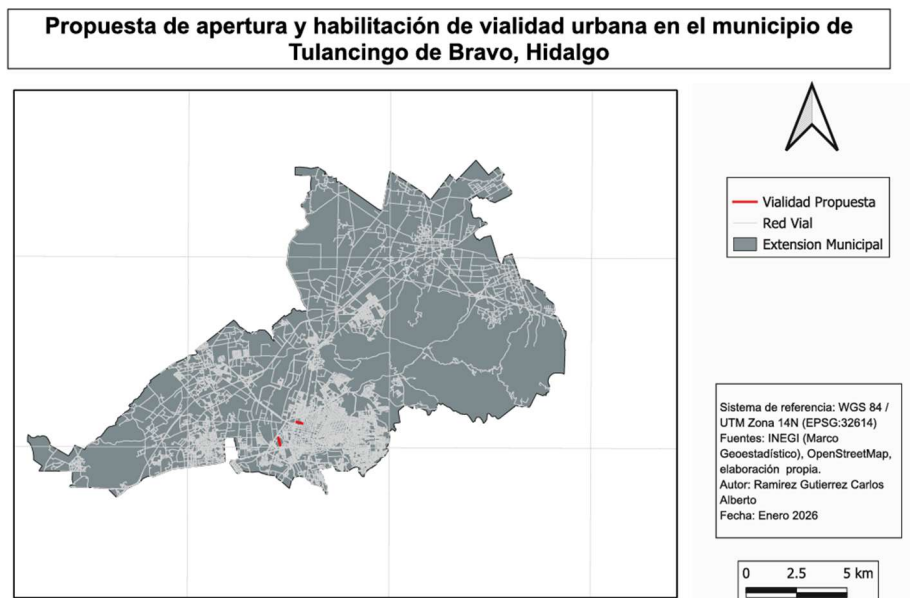
Con el propósito de mejorar la conectividad urbana y redistribuir los flujos vehiculares en el municipio, se propone la apertura de dos nuevas conexiones viales estratégicas. Estas intervenciones buscan fortalecer la continuidad de la red vial y disminuir la dependencia de algunos corredores que actualmente presentan altos niveles de saturación.

La apertura de nuevas vialidades se plantea como una estrategia de redistribución de flujos más que como un incremento directo de capacidad. En términos de ingeniería de tránsito, la generación de rutas alternas permite reducir la carga sobre corredores saturados, mejorar la conectividad urbana y disminuir la vulnerabilidad del sistema ante incrementos de demanda.

No obstante, este tipo de intervenciones debe evaluarse cuidadosamente para evitar inducir demanda adicional, por lo que su implementación se justifica principalmente en zonas donde existe déficit de conectividad y concentración excesiva de flujos en pocas vialidades.

La primera vialidad propuesta contempla la conexión entre el Boulevard La Morena y la calle Jiménez, dando continuidad a la calle Rayón Poniente. Este nuevo tramo tendría una longitud aproximada de 280 metros y permitiría mejorar la accesibilidad entre las zonas habitacionales y comerciales del sector. La segunda vialidad propone la apertura de una conexión entre el Boulevard Lázaro Cárdenas y la carretera Ecatepec–Tulancingo, con una longitud aproximada de 400 metros. Esta conexión permitirá ofrecer una ruta alternativa para los desplazamientos locales y reducir la presión vehicular sobre el Boulevard Bicentenario.

Desde la perspectiva del diseño urbano, ambas vialidades deberán desarrollarse bajo los criterios de calles completas, incorporando carriles de circulación, banquetas continuas, iluminación pública y señalización adecuada, en concordancia con los lineamientos establecidos en el Manual de Calles.



Mapa 7. Propuesta de apertura y habilitación de nuevas vialidades urbanas en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo.

Fuente: elaboración propia.

En conjunto, las propuestas planteadas conforman un paquete integral de intervención que combina medidas de gestión del tránsito, mejora de la infraestructura existente y promoción de modos de movilidad sostenibles. Su implementación no requiere transformaciones estructurales de gran escala, sino una adecuada priorización de acciones, coordinación institucional y seguimiento técnico.

Este enfoque permite abordar la congestión vehicular desde una perspectiva eficiente y viable, alineada con los principios de movilidad urbana sostenible y con las condiciones específicas del municipio de Tulancingo.

CONCLUSIONES

La presente investigación abordó de manera integral la relación entre el crecimiento urbano y la congestión vehicular en la ciudad de Tulancingo de Bravo, Hidalgo, lo que permitió identificar los factores estructurales que condicionan el funcionamiento de su sistema de movilidad y formular un conjunto de propuestas técnicas, sostenibles y viables para su atención a escala municipal. A partir del análisis territorial, los aforos vehiculares, la observación de campo y la aplicación de encuestas de percepción ciudadana, se evidenció que la congestión vehicular constituye un problema multifactorial que trasciende el ámbito estrictamente operativo del tránsito y se relaciona directamente con la forma en que ha crecido y se ha organizado la ciudad.

Los resultados obtenidos confirman que Tulancingo presenta un patrón de expansión urbana dispersa, una fuerte concentración de actividades económicas y de servicios en el centro urbano y una elevada dependencia del automóvil particular como principal medio de desplazamiento. Estas condiciones han generado una presión creciente sobre la infraestructura vial existente, provocando la saturación de los corredores estratégicos, el incremento de los tiempos de traslado y la reducción de la eficiencia operativa del sistema de movilidad urbana.

El análisis de los aforos vehiculares permitió identificar volúmenes de tránsito elevados en intersecciones clave del sistema vial, destacando el cruce del Boulevard Emiliano Zapata con la calle 21 de Marzo, donde se registraron valores promedio cercanos a 6,006 vehículos por hora, así como niveles significativos de demanda en el Boulevard Bicentenario y en el Libramiento a Cuauhtémoc. Estos resultados evidencian que ciertos corredores concentran una proporción importante de los desplazamientos urbanos y operan en condiciones cercanas a su capacidad durante los periodos de mayor demanda.

Desde la perspectiva de la ingeniería civil aplicada a la movilidad, la investigación demuestra que la congestión vehicular no es consecuencia exclusiva de la insuficiencia física de las vialidades, sino del funcionamiento fragmentado del sistema urbano, en el que la planeación territorial, la infraestructura vial, el transporte público, la movilidad activa y la gestión del tránsito no han sido concebidos de manera integrada. Esta falta de articulación explica la ineficiencia operativa del sistema y evidencia la necesidad de avanzar hacia enfoques de movilidad urbana más integrales y sostenibles.

La presente investigación aporta un diagnóstico técnico integral de la congestión vehicular en una ciudad intermedia, integrando análisis de tránsito, percepción ciudadana y evaluación de la infraestructura, lo que permite proponer soluciones viables adaptadas al contexto local.

En este contexto, las propuestas formuladas en la investigación que incluyen la implementación y sincronización de semáforos en intersecciones estratégicas, la instalación de un semáforo peatonal en el centro histórico, la apertura y habilitación de nuevas vialidades urbanas para redistribuir los flujos vehiculares y el desarrollo de una red ciclista integrada de aproximadamente 15.2 kilómetros constituyen una respuesta técnica coherente con las condiciones físicas, urbanas e institucionales del municipio. Estas intervenciones se orientan a optimizar el funcionamiento del espacio vial existente y a diversificar las alternativas de movilidad, reduciendo la dependencia exclusiva del automóvil.

Asimismo, la incorporación de la percepción ciudadana permitió corroborar que la congestión vehicular es un problema ampliamente reconocido por la población. Los resultados de la encuesta evidenciaron que una proporción significativa de los habitantes considera que el transporte público presenta deficiencias en su calidad y competitividad frente al automóvil particular, lo que refuerza la tendencia al uso del vehículo privado. Sin embargo, también se identificó una disposición favorable a la implementación de alternativas de movilidad más eficientes y sostenibles, siempre que se garantice la seguridad, la confiabilidad y la continuidad de las políticas públicas.

En síntesis, la investigación concluye que el municipio de Tulancingo cuenta con condiciones técnicas, urbanas y sociales que permiten avanzar hacia un modelo de movilidad urbana más eficiente, equitativo y sostenible. Para ello resulta indispensable adoptar una visión integral que articule la ingeniería vial, la planeación territorial, la gestión del tránsito, el fortalecimiento del transporte público y la promoción de la movilidad activa como componentes complementarios del desarrollo urbano.

Finalmente, el estudio aporta evidencia empírica y un conjunto de lineamientos técnicos que pueden servir de referencia para la planeación de la movilidad en ciudades intermedias mexicanas con características similares, contribuyendo al desarrollo de estrategias de movilidad más eficientes y sostenibles en contextos urbanos de escala media.

Conclusiones específicas

- 1- El crecimiento urbano disperso y la concentración funcional del centro histórico constituyen los principales generadores de viajes motorizados y de congestión vial en el municipio de Tulancingo.
- 2- Los aforos vehiculares realizados permitieron identificar intersecciones con altos niveles de demanda y conflictos operativos, en particular en los corredores del Boulevard Emiliano Zapata, del Boulevard Bicentenario y del Libramiento a Cuauhtémoc.
- 3- Las intersecciones Miguel Hidalgo – Luis M. Ponce y Miguel Hidalgo – Benito Juárez presentan condiciones operativas que justifican la implementación de sistemas semafóricos coordinados con operación diferenciada en los horarios de mayor demanda.
- 4- La intersección Avenida Gilberto Gómez Carbajal – Libramiento Tulancingo– Santiago Tulantepec requiere regulación semafórica para mejorar la seguridad vial y la conectividad entre los tránsitos urbano y regional.
- 5- La propuesta de una red ciclista integrada de 15.2 km se identifica como una alternativa viable para promover la movilidad activa, mejorar la conectividad urbana y reducir la dependencia del automóvil particular.
- 6- La apertura de nuevas vialidades urbanas y la instalación de un semáforo peatonal en el centro histórico representan medidas puntuales de gestión del tránsito que pueden contribuir a redistribuir los flujos vehiculares y mejorar la convivencia entre peatones y vehículos.
- 7- La aplicación de encuestas permitió identificar una percepción ciudadana crítica respecto al transporte público, así como una disposición favorable a la implementación de soluciones integrales de movilidad urbana.

REFERENCIAS

- Abdullah, M., Ali, N., Aslam, A. B., Javid, M. A., & Hussain, S. A. (2022). Factors affecting the mode choice behavior before and during COVID-19 pandemic in Pakistan. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 11(1), 174–186. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2021.06.005>
- Abdullah, M., Ali, N., Hussain, S. A., Aslam, A. B., & Javid, M. A. (2021a). Measuring changes in travel behavior patterns due to COVID-19 in a developing country: A case study of Pakistan. *Transport Policy*, 108, 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.04.023>
- Abdullah, M., Ali, N., Javid, M. A., Dias, C., & Campisi, T. (2021b). Public transport versus solo travel mode choices during the COVID-19 pandemic: Self-reported evidence from a developing country. *Transportation Engineering*, 5, 100078. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100078>
- Ali, N., Sagmanli, S. S., Dadashzadeh, N., & Ouelhadj, D. (2025). Modelling the mode choice behaviour of Mobility-as-a-Service (MaaS) users in the Solent of the UK. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 29, 101335. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101335>
- Anupriya, B., P., & Graham, D. J. (2023). Congestion in cities: Can Road capacity expansions provide a solution? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 174, 103726. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103726>
- Arellana, J., Alvarez, V., Oviedo, D., & Guzman, L. A. (2021). Walk this way: Pedestrian accessibility and equity in Barranquilla and Soledad, Colombia. *Research in Transportation Economics*, 86, 101024. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.101024>
- Arellana, J., Saltarín, M., Larrañaga, A. M., Álvarez, V., & Henao, C. A. (2020). Urban walkability considering pedestrians' perceptions of the built environment: A 10-year review and a case study in a medium-sized city in Latin America. *Transport Reviews*, 40(2), 183–203. <https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1703842>
- Atlas de Riesgos del Municipio de Tulancingo. (2017). *Actualización del Atlas de Riesgos del Municipio de Tulancingo*.
- Attard, M., Guzmán, L. A., & Oviedo, D. (2023). Urban space distribution: The case for a more equitable mobility system. *Case Studies on Transport Policy*, 14, 101096. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.101096>

-
- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 15(2), 73–80.
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005>
- Bebber, S., Libardi, B., De Atayde Moschen, S., Correa da Silva, M. B., Fachinelli, A. C., & Nogueira, M. L. (2021). Sustainable mobility scale: A contribution to sustainability assessment systems in urban mobility. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 100271.
<https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100271>
- Bian, R., Tolford, T., Liu, S., & Gangireddy, S. (2023). Lessons learned from evaluating complete-streets project outcomes using emerging data sources. *Transportation Planning and Technology*, 46(6), 754–772.
<https://doi.org/10.1080/03081060.2023.2214136>
- Bibri, S. E., Krogstie, J., & Kärrholm, M. (2020). Compact city planning and development: Emerging practices and strategies for achieving the goals of sustainability. *Developments in the Built Environment*, 4, 100021.
<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100021>
- Carboni, A., & Coskun, I. (2025). Methods for assessing the role of traffic management in mitigating the environmental impacts of urban road transport: An overview. *Transportation Research Procedia*, 90, 663–670.
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.06.094>
- Comisión Nacional de Vivienda [CONAVI]. (2020). *Informe anual de vivienda en México*.
<https://www.gob.mx/conavi>
- DataMéxico. (2023). *Parque vehicular y movilidad en México*. Secretaría de Economía.
<https://datamexico.org>
- Deliali, K., Christofa, E., & Knodler, M. (2021). The role of protected intersections in improving bicycle safety and driver's right-turning behaviour. *Accident Analysis and Prevention*, 159, 106295. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106295>
- Fitch, D. T., Carlen, J., & Handy, S. L. (2022). What makes bicyclists comfortable? Insights from a visual preference survey of casual and prospective bicyclists. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 155, 434–449.
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.11.008>
- Friel, D., Wachholz, S., Werner, T., Zimmermann, L., Schwedes, O., & Stark, R. (2023). Cyclists' perceived safety on intersections and roundabouts: A qualitative bicycle simulator study. *Journal of Safety Research*, 87, 143–156.
<https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.09.012>

-
- Garber, M. D., Watkins, K. E., Flanders, W. D., Kramer, M. R., Lobelo, R. L. F., Mooney, S. J., Ederer, D. J., & McCullough, L. E. (2023). Bicycle infrastructure and the incidence rate of crashes with cars: A case-control study with Strava data in Atlanta. *Journal of Transport and Health*, 32, 101669.
<https://doi.org/10.1016/j.jth.2023.101669>
- Giesen, R., Hidalgo, D., & Ramos, R. (2025). Public transport: status and research priorities for Latin America and the Caribbean. *Latin American Transport Studies*, 3, 100025.
<https://doi.org/10.1016/j.latran.2025.100025>
- Gobierno de México. (2022). *Ley General de Movilidad y Seguridad Vial*. Diario Oficial de la Federación.
- Gobierno del Estado de Hidalgo & Ayuntamiento de Tulancingo de Bravo [PIMUS Tulancingo]. (2018). *Plan Integral de Movilidad Urbana Sustentable de Tulancingo*.
- Gobierno Municipal de Tulancingo. (2020). *Plan Municipal de Desarrollo 2020–2024*. Ayuntamiento de Tulancingo de Bravo.
- Gössling, S., & McRae, S. (2022). Subjectively safe cycling infrastructure: New insights for urban designs. *Journal of Transport Geography*, 101, 103340.
<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103340>
- Guo, X., Tavakoli, A., Angulo, A., Robartes, E., Chen, T. D., & Heydarian, A. (2023). Psychophysiological measures on a bicycle simulator in immersive virtual environments: How protected/curbside bike lanes may improve perceived safety. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 92, 317–336.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2022.11.015>
- Hansel, J. (2025). Governing mobility hubs in the sustainable urban mobility transition: Dynamics of stability and change. *Transport Policy*, 163, 323–334.
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2025.01.026>
- Huemer, A. K., Rosenboom, L. M., Naujoks, M., & Banach, E. (2022). Testing cycling infrastructure layout in virtual environments: An examination from a bicycle rider's perspective in simulation and online. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 14, 100586.
<https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100586>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Larrañaga, A. M., Ortúzar, J. de D., Oviedo, D., & Ruiz-Padillo, A. (2025). Active mobility, equity, and inclusion. *Latin American Transport Studies*, 3, 100040.
<https://doi.org/10.1016/j.latran.2025.100040>

-
- Maisel, J. L., Baek, S. R., & Choi, J. (2021). Evaluating users' perceptions of a Main Street corridor: Before and after a Complete Street project. *Journal of Transport and Health*, 23, 101276. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2021.101276>
- McQueen, M., Abou-Zeid, G., MacArthur, J., & Clifton, K. (2021). Transportation transformation: Is micromobility making a macro impact on sustainability? *Journal of Planning Literature*, 36(1), 46–61. <https://doi.org/10.1177/0885412220972696>
- Mockus, A., & Jasiūnienė, V. (2024). The impact of street humanisation on road safety. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 19(2), 66–84. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2024-19.636>
- Nazemi, M., van Eggermond, M. A. B., Erath, A., Schaffner, D., Joos, M., & Axhausen, K. W. (2021). Studying bicyclists' perceived level of safety using a bicycle simulator combined with immersive virtual reality. *Accident Analysis and Prevention*, 151, 105943. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105943>
- Papadakis, D. M., Savvides, A., Michael, A., & Michopoulos, A. (2024). Advancing sustainable urban mobility: Insights from best practices and case studies. *Fuel Communications*, 20, 100125. <https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2024.100125>
- Preston, A., & Pulugurtha, S. S. (2021). Simulating and assessing the effect of a protected intersection design for bicyclists on traffic operational performance and safety. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9, 100329. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100329>
- Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos [ONU-Hábitat]. (2020). *World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization*. <https://unhabitat.org/world-cities-report-2020-the-value-of-sustainable-urbanization>
- Pucher, J., & Buehler, R. (2012). *City cycling*. MIT Press.
- Rivera Olsson, S., & Elldér, E. (2023). Are bicycle streets cyclist-friendly? Micro-environmental factors for improving perceived safety when cycling in mixed traffic. *Accident Analysis and Prevention*, 184, 107007. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107007>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (2015). *Normativa para la infraestructura del transporte (N·PRY·CAR)*.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano [SEDATU]. (2019a). *Manual de calles: Diseño vial para ciudades mexicanas*. <https://www.gob.mx/sedatu/documentos/manual-de-calles-diseno-vial-para-ciudades-mexicanas>

-
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano [SEDATU]. (2019b). *Programa Nacional de Desarrollo Urbano 2019–2024*.
- Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [SICT]. (2024). *Manual de señalización y dispositivos para el control del tránsito en calles y carreteras*. <https://www.gob.mx/sedatu/documentos/manual-de-senalizacion-y-dispositivos-para-el-control-del-transito-en-calles-y-carreteras>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2021). *Inventario nacional de emisiones de contaminantes criterio [INEM]* <https://www.gob.mx/semarnat>
- Singleton, P. A., & Poudel, N. (2023). Bicycling comfort at roundabouts: Effects of design and situational factors. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 94, 227–242. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2023.02.008>
- Smart Growth America. (2020). *Dangerous by design 2020*. <https://smartgrowthamerica.org/dangerous-by-design/>
- Transportation Research Board [TRB]. (2022). *Highway capacity manual* (7th ed.). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26432>
- van der Craats, J., van Lierop, D., & Duran-Rodas, D. (2025). Social inclusion in sustainable urban mobility plans (SUMP): The case of shared mobility in Utrecht, the Netherlands. *Journal of Transport Geography*, 126, 104234. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2025.104234>
- Vasilev, M., Pritchard, R., & Jonsson, T. (2022). Mixed-methods approach to studying multiuser perceptions of an interim Complete Streets project in Norway. *Travel Behaviour and Society*, 29, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2022.05.002>
- Vasilev, M., Pritchard, R., Jonsson, T., & Panek, J. (2023). An exploration of multiuser perceptions of a Norwegian Complete Streets modification using interim design strategies. *Case Studies on Transport Policy*, 13, 101058. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.101058>
- Witchayaphong, P., Pravinvongvuth, S., Kanitpong, K., Sano, K., & Horpibulsuk, S. (2020). Influential factors affecting travelers' mode-choice behavior for mass transit in Bangkok, Thailand. *Sustainability*, 12(22), 9522. <https://doi.org/10.3390/su12229522>
- Zhang, H., Zhang, L., Liu, Y., & Zhang, L. (2023). Understanding travel mode choice behavior: Influencing factors analysis and prediction with machine learning method. *Sustainability*, 15(14), 11414. <https://doi.org/10.3390/su151411414>

ANEXO A

Intersección Boulevard Emiliano Zapata – Calle 21 de Marzo

En el presente anexo se presentan los registros del aforo vehicular realizados en la intersección del Boulevard Emiliano Zapata con 21 de Marzo.

El levantamiento se efectuó mediante un conteo manual clasificado durante un día hábil representativo, en los periodos de mayor demanda (07:00–09:00 y 16:00–18:00 horas).

Los datos se presentan desagregados en intervalos de 15 minutos para facilitar el análisis de la variación del flujo vehicular.

Tabla A1. Registro de aforo vehicular por intervalos de 15 minutos

Intersección: Boulevard Emiliano Zapata – Calle 21 de Marzo

Ubicación	Hora base	Intervalo 15 min	Vehículo ligero	Transporte público	Carga	Autobús	Motocicleta	Bicicleta	Total
Emiliano Zapata - 21 de Marzo	07:00-08:00	07:00-07:15	704	157	267	13	115	13	1268
		07:15-07:30	768	172	291	14	125	14	1383
		07:30-07:45	831	186	315	15	136	15	1498
		07:45-08:00	895	200	339	16	146	16	1614
		Comprobación hora	3198	715	1212	58	522	58	5763
	08:00-09:00	08:00-08:15	961	203	288	17	153	17	1640
		08:15-08:30	892	189	267	16	143	16	1523
		08:30-08:45	824	174	247	15	132	15	1406
		08:45-09:00	755	160	226	13	121	13	1288
		Comprobación hora	3432	726	1028	61	549	61	5857
	16:00-17:00	16:00-16:15	727	152	263	13	119	13	1288
		16:15-16:30	830	174	301	15	136	15	1472
		16:30-16:45	900	188	326	17	147	17	1594
		16:45-17:00	1004	210	364	18	165	18	1778
		Comprobación hora	3461	724	1254	63	567	63	6132
	17:00-18:00	17:00-17:15	1069	213	323	20	175	20	1819
		17:15-17:30	958	191	290	17	157	17	1631
		17:30-17:45	884	177	267	16	145	16	1505
		17:45-18:00	774	155	234	14	126	14	1317
		Comprobación hora	3685	736	1114	67	603	67	6272

Fuente: elaboración propia con base en aforos de campo.

ANEXO B

Intersección Boulevard Bicentenario – Avenida Tomás Alva Edison

La presente tabla registra el aforo vehicular en la intersección del Boulevard Bicentenario con la Avenida Tomás Alva Edison, uno de los corredores urbanos con actividad comercial y de servicios dentro del municipio de Tulancingo.

El levantamiento se efectuó mediante conteo manual clasificado durante un día hábil representativo, en los periodos de mayor demanda vehicular, correspondientes a los horarios de 07:00 a 09:00 horas y de 16:00 a 18:00 horas.

Los datos se presentan desagregados por tipo de vehículo, considerando las categorías de vehículos ligeros, transporte público, vehículos de carga, autobuses, motocicletas y bicicletas, lo que permite analizar la composición del tránsito en esta intersección. Esta información sirve como base para identificar la intensidad del flujo vehicular y comprender las dinámicas de movilidad en este corredor urbano.

Tabla B1. Registro de aforo vehicular clasificado por intervalos de 15 minutos en la intersección Boulevard Bicentenario – Avenida Tomás Alva Edison, Tulancingo, Hidalgo

Ubicación	Hora base	Intervalo 15 min	Vehículo ligero	Transporte público	Carga	Autobús	Motocicleta	Bicicleta	Total
Bicentenario - Tomás A. Edison	07:00-08:00	07:00-07:15	413	67	107	3	67	15	672
		07:15-07:30	450	73	117	3	73	16	733
		07:30-07:45	488	79	127	4	79	18	795
		07:45-08:00	525	86	137	4	86	19	856
		Comprobación hora	1876	305	488	14	305	68	3056
	08:00-09:00	08:00-08:15	564	91	143	3	90	15	906
		08:15-08:30	524	84	133	3	83	14	841
		08:30-08:45	483	78	123	3	77	12	776
		08:45-09:00	443	71	113	3	70	11	711
		Comprobación hora	2014	324	512	12	320	52	3234
	16:00-17:00	16:00-16:15	434	71	113	3	70	14	704
		16:15-16:30	495	81	129	3	80	16	805
		16:30-16:45	537	87	139	4	87	18	872
		16:45-17:00	599	97	155	4	97	20	972
		Comprobación hora	2065	336	536	14	334	68	3353
	17:00-18:00	17:00-17:15	634	103	165	6	102	30	1040
		17:15-17:30	568	93	148	6	91	27	932
		17:30-17:45	525	86	136	5	84	24	860
		17:45-18:00	459	75	119	4	74	21	753
		Comprobación hora	2186	357	568	21	351	102	3585

Fuente: elaboración propia con base en aforos de campo.

ANEXO C

Intersección Libramiento a Cuauhtec – Calle Primero de Abril

La siguiente tabla presenta los resultados del aforo vehicular medido en la intersección del Libramiento a Cuauhtec con Calle Primero de Abril, un punto estratégico de conexión entre el tránsito urbano y los desplazamientos intermunicipales en el municipio de Tulancingo.

El registro se llevó a cabo mediante conteo manual clasificado, durante un día hábil representativo, en los periodos de mayor demanda vehicular comprendidos entre 07:00 y 09:00 horas, así como entre 16:00 y 18:00 horas.

La información se organiza según la clasificación vehicular utilizada en el estudio, que incluye vehículos ligeros, transporte público, vehículos de carga, autobuses, motocicletas y bicicletas, lo que permite analizar la composición modal del tránsito. Estos datos contribuyen al diagnóstico de la movilidad urbana y permiten identificar la influencia del tránsito regional en el funcionamiento de la intersección.

Tabla C1. Registro de aforo vehicular clasificado por intervalos de 15 minutos en la intersección Libramiento a Cuauhtec – Calle Primero de Abril, Tulancingo, Hidalgo

Ubicación	Hora base	Intervalo 15 min	Vehículo ligero	Transporte público	Carga	Autobús	Motocicleta	Bicicleta	Total
Libramiento a Cuauhtec - 1ro de Abril	07:00-08:00	07:00-07:15	443	63	135	3	55	8	708
		07:15-07:30	483	69	148	3	60	9	772
		07:30-07:45	524	75	160	3	66	9	836
		07:45-08:00	564	81	172	3	71	10	901
		Comprobación hora	2014	288	615	12	252	36	3217
	08:00-09:00	08:00-08:15	609	82	141	4	74	10	920
		08:15-08:30	565	76	131	4	68	10	854
		08:30-08:45	522	71	120	4	63	9	789
		08:45-09:00	479	65	110	3	58	8	723
		Comprobación hora	2175	294	502	15	263	37	3286
	16:00-17:00	16:00-16:15	475	66	130	4	57	8	740
		16:15-16:30	543	75	148	4	66	10	845
		16:30-16:45	588	81	161	5	71	10	916
		16:45-17:00	656	90	179	5	79	11	1021
		Comprobación hora	2262	312	618	18	273	39	3522
	17:00-18:00	17:00-17:15	690	95	118	4	83	12	1001
		17:15-17:30	618	85	106	3	75	11	898
		17:30-17:45	571	79	97	3	69	10	829
		17:45-18:00	499	69	85	3	60	8	725
		Comprobación hora	2378	328	406	13	287	41	3453

Fuente: elaboración propia con base en aforos de campo.