

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



TESIS

Para Doctorado en Ingeniería:

“Modelación de escenarios de emisión de gases efecto invernadero mediante el rendimiento vehicular, en una vía principal urbana del noroeste de México”

Elaborado por:

Yidanes Alejandra Ibañez Acevedo

Directora de tesis:

Dra. Samantha E. Cruz Sotelo

ÍNDICE

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. OBJETIVO GENERAL:	11
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:	11
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.3.1 <i>Justificación</i>	12
1.3.2 <i>Alcances</i>	21
1.3.3 <i>Hipótesis</i>	21
2. ANTECEDENTES	21
2.1. CARACTERÍSTICAS URBANAS DE MEXICALI.	23
2.2. CALIDAD DEL AIRE EN MEXICALI.	26
2.3. ESTUDIOS PREVIOS	28
3. MARCO TEÓRICO	30
3.1. CLASIFICACIÓN	32
3.1.1. <i>POR SU FUNCIÓN:</i>	32
3.1.2. <i>POR SUS CARACTERÍSTICAS:</i>	32
3.1.3. <i>POR SU JERARQUIA FUNCIONAL:</i>	32
3.2. ESTUDIOS A ESCALA LOCAL.....	34
3.3. MODELACIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR.....	37
3.4. EMISIONES POR TIPO DE COMBUSTIBLE	39
4. METODOLOGÍA	42
4.1. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	45
4.2. ESTRUCTURACIÓN DEL MODELO AMBIENTAL.....	49
4.3. OBTENCIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN	51
5. RESULTADOS	54
5.1. SIMULACIÓN DE DATOS	54
5.2. PLANEACIÓN Y SIMULACIÓN DE ACCIONES DE MEJORAS VIALES.....	58
5.3. PROYECCIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN Y MODELACIÓN DE EMISIONES DE CO2 EQUIVALENTE.....	59
6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	62
REFERENCIAS	69

Lista de Abreviaturas

BNE	Balance Nacional de Energía
CCA	Cooperación Ambiental de América del Norte.
CH ₄	Metano
CMM	Centro Mario Molina
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONACyT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CONAPO	Consejo Nacional de Población
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
EEUU	Estados Unidos de América
GEI	Gases Efecto Invernadero
IEA	Agencia Internacional de Energía
IMECA	Índice Metropolitano de la Calidad del Aire
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPCC	Panel Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático
N ₂ O	Óxido Nitroso
NH ₃	Amoniaco
NOx	Óxidos de Nitrógeno
OMS	Organización Mundial de la Salud
PB	Plomo
PEAC	Plan Estatal de Acción de Cambio Climático
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PIPCA	Programa Integral de Pavimentación y Calidad del Aire
PM	Material Particulado
PM ₁₀	Micro Partículas Respirables Menores a los 10 Micrómetros de Diámetro
PVVO	Programa Estatal de Verificación Vehicular Obligatorio
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales

SENER	Secretaría de Energía
SIDUE	Secretaría de Infraestructura y Desarrollo Urbano
SIG	Sistema de Información Geográfica
SO ₂	Bióxido de Azufre
TMCA	Tasa Media de Crecimiento Anual
TSP	Total de Partículas Suspendidas
UABC	Universidad Autónoma de Baja California
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire forma parte de la vida moderna; recientemente se ha incrementado la preocupación por ésta en todo el mundo, esto debido al aumento de las emisiones de GEI resultantes de las actividades de los distintos sectores en energía (Klemm, 2022), transporte (Sajede et al, 2022) (Menendez, 2022), agricultura (Guo et al, 2022), construcción (Fang, 2021), manejo de desechos (Górka et al, 2021), forestación y reforestación (Shrestha, 2015) (Stubenrauch et al, 2022), etc.

La contaminación del aire es un residuo de la manera en cómo se producen o llevan a cabo todas las actividades humanas; y la causa principal es la combustión, la cual es esencial para el hombre; las impurezas del combustible, una incorrecta relación entre el combustible y el aire, o temperaturas de combustión demasiado altas o demasiado bajas son causa de la formación de productos secundarios, tales como monóxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, cenizas finas e hidrocarburos no quemados –todos ellos son contaminantes del aire (Wark, 1998).

De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía (IEA), el segundo sector industrial más grande en términos de emisiones de carbono es el sector transporte (IEA, 2019); en 2011 las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) atribuibles al transporte alcanzaron 22% de las emisiones por producción y consumo de energía (detrás del sector de generación eléctrica y de calor con 42% y poco más que las emisiones de la industria con 21%). Bajo la tendencia actual se prevé que éstas lleguen al 40% en 2035. En particular, el autotransporte contribuyó en 2011 con dos terceras partes de las emisiones del transporte y ha sido el principal responsable de su acelerado crecimiento (52% en 1990-2011).

De acuerdo con estimaciones propias sustentadas en la metodología del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en el año 2012 el transporte en México representó 39% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) asociadas a la producción y uso de la energía. A pesar de que, de acuerdo con el Balance Nacional de Energía (BNE) (SENER, 2012), el autotransporte representa 92% del consumo del sector, no existen datos oficiales

acerca de la demanda de combustibles por sub modos del autotransporte (transporte de carga o de pasajeros, público o particular, urbano e interurbano, etc.).

En relación con México, en su artículo; Chávez y Sheinbaum (2015), presentan dos escenarios para la mitigación de contaminantes criterio y de GEI asociados al transporte de pasajeros en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, y que en conjunto con expertos en el tema de vialidad urbana (Jazalevich et al, 2011) evalúan la introducción de vehículos híbridos en la Ciudad de México, analizan la factibilidad ambiental y económica del etanol de caña como sustituto de la gasolina en el transporte en México en 2010-2030 (García et al, 2012), al tiempo que discuten el potencial de uso de biodiésel en el transporte en México (Lozada et al, 2010).

Mexicali es la tercera ciudad más contaminada de la República Mexicana en términos generales y la segunda más contaminada por micro partículas respirables menores a los diez micrómetros de diámetro (PM10) (Quintero et al, 2006). Los estándares de protección al ambiente (50 µg/m³), son rebasados de manera continua durante prácticamente todo el año (Molina, 2007), de ahí que se busque una solución para la mejora de este problema que abarca una serie de muchas consecuencias provocadas por las diferentes fuentes emisoras como se puede observar en la Tabla 1; en este caso en particular tiene el enfoque en las fuentes móviles; las principales emisiones de GEI que provocan los vehículos son: el N₂O (óxido de nitrógeno), el CH₄ (metano) y CO₂ (dióxido de carbono), los cuales se expresan también en términos de CO₂ equivalente (CO₂e) (ProAire, 2011).

Tabla 1. Inventario de Emisiones de Mexicali (1996) (SEMARNAT-INE, 2007)

TIPO DE FUENTE DE EMISIÓN	CONTAMINANTE (%)				
	PM ₁₀	SO ₂	CO	NO _x	HC
Fuentes puntuales	2	75	2	8	2
Fuentes de área	73	0.3	7	4	30
Fuentes móviles	1	24.7	91	81	61
Vegetación y suelos	24	N/A	N/A	7	7

Los estudios de evaluación de vialidades en zonas urbanas y la exposición de emisiones contaminantes como consecuencia del tráfico vehicular en el mundo en desarrollo son importantes. Aunque en los últimos años se ha observado un número cada vez mayor de estudios de exposición a la contaminación relacionados con el tráfico, los datos de evaluación de la exposición sobre este tema aún son limitados. Las diferencias entre los métodos de medición y la falta de un estricto control de calidad en la realización de la evaluación de la exposición hacen que sea difícil generalizar y comparar los resultados entre los estudios.

Esta problemática se agudiza debido al gran aumento del parque de automóviles y el indiscriminado deseo de usarlos, por razones de comodidad o estatus, especialmente los países en desarrollo ejercen una gran y creciente presión sobre la capacidad de las vías públicas existentes (Xiaoyu et al, 2009) (Gebisa et al, 2021). Los fuertes impactos negativos de la congestión vehicular (Kaida, 2015) (Ajay et al, 2022), tanto inmediatos como de largo plazo, exigen esfuerzos multidisciplinarios para mantenerla bajo control, mediante el diseño de medidas apropiadas, entre las que se encuentran: mejoras en la tecnología del transporte y adecuación de la infraestructura vial (Kumar et al, 2021) (Moussa, 2022).

Entre algunos datos de emisiones y actividad vehicular que se han hecho en Baja California por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio climático (INECC) sobresalen los siguientes:

- El 70% del parque vehicular de Baja California se compone de vehículos destinados al transporte particular de personas (automóviles más SUV), en segundo lugar, están las camionetas Pick up y VAN.
- En promedio, el 80% de los vehículos que circulan en Mexicali y Tijuana son vehículos importados usados de los Estados Unidos.
- En general, el 60% de los vehículos que circulan en Baja California tienen más de 10 años de antigüedad (modelo 1991 y anteriores). Playas de Rosarito presenta la mayor proporción de vehículos de modelo anterior a 1990.
- De acuerdo con los resultados de la encuesta, el 55% de los vehículos que circulan en Baja California cuentan con el convertidor catalítico original, mientras

que el 85% del parque vehicular no ha sido sometido a una revisión de sus emisiones en México.

- El parque vehicular de Mexicali, Tijuana, Ensenada, Playas de Rosarito y Tecate que fue evaluado mediante el equipo de detección remota presenta una tendencia a la baja en emisiones conforme el modelo del vehículo es más reciente. No obstante, en todos los estratos de edad se observaron automóviles con altas emisiones (INECC, 2011).

La definición de tráfico vehicular se relaciona con el congestionamiento vial, es decir alta densidad de vehículos en una zona de la ciudad, mientras que, la movilidad urbana se refiere a crear hábitos de transporte integrales (mejoras) que reduzcan el costo energético, la contaminación ambiental y los accidentes viales (EPA, 2009) (Shokoohyar et al, 2022) (Obaid, 2021).

La difícil y creciente movilidad está asociada a un patrón urbano cada vez más disperso, con poca mezcla de usos del suelo, actividades poco diversificadas y que propicia un desorden territorial que amenaza las reservas territoriales del suelo de conservación. Esta movilidad cada vez más lenta afecta y repercute disminuyendo la calidad del aire, deteriorando la salud y afectando los usos del tiempo de todos los habitantes.

La tendencia al incremento de los viajes en toda la zona metropolitana se enfrenta sin embargo a déficits, insuficiencias y distorsiones de la red vial y de la red de transporte, donde puede acentuarse una diferencia entre los grandes corredores de origen destino de los viajes, el trazado, diseño, organización e incremento de las capacidades de ambas redes, la vial y la de transporte. Esta discrepancia y el incremento constante de automotores, además del patrón urbano disperso, obliga a más viajes, cada vez más largos y más lentos, afectando de manera directa a las vialidades primarias, pero también a las vialidades cercanas a ellas (XVIII Ayuntamiento de Mexicali, 2005).

En particular se resalta que la movilidad se sustenta actualmente en una estructura modal distorsionada, que tiene su mayor potencial de traslado en unidades de baja capacidad, con altos costos ambientales, desorden en las rutas y de inseguridad para los usuarios, que además esa estructura modal tiene

escasa integración que no aprovecha a la gran infraestructura de transporte de alta capacidad ya instalada, y que utiliza de manera desventajosa a las vialidades primarias que son saturadas por los autos privados mayoritariamente (Española, R.A., 2010).

La movilidad es una red vial, donde a su saturación se le suman las deficiencias en la administración, control y regulación del tráfico, así como una escasa cultura vial que colaboran a acentuar los congestionamientos. El resultado es una saturación crónica y la consiguiente reducción de velocidad junto a un mayor impacto ambiental. En ese sentido, el aumentar la movilidad del flujo vial continuo se realiza considerando un proyecto de modelación; con un aprovechamiento de sus infraestructuras acumuladas para mantener y potenciar los servicios ambientales y con mayor regulación de la contaminación.

La elaboración de un modelo ambiental parte de la necesidad de analizar el comportamiento de la movilización vial en conjunto con los contaminantes atmosféricos que esta actividad nos genera y que permita identificarlos, cuantificarlos y desarrollar estrategias para su abatimiento.

El Centro Mario Molina (CMM, 2008) realizó un inventario de gases efecto invernadero (GEI) en el año base 2005 para el estado de Baja California, cuyos resultados indican que en ese año, en la entidad se emitieron aproximadamente 18 mil gigagramos de bióxido de carbono equivalente (CO₂ eq), siendo el sector energético el principal contribuyente con un 79% respecto al total estatal, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles en los sectores de transporte y de generación de energía eléctrica. Como se puede apreciar en la Figura 1, se hizo un resumen de los principales rubros en cuanto a su aportación de emisiones de GEI en porcentaje.

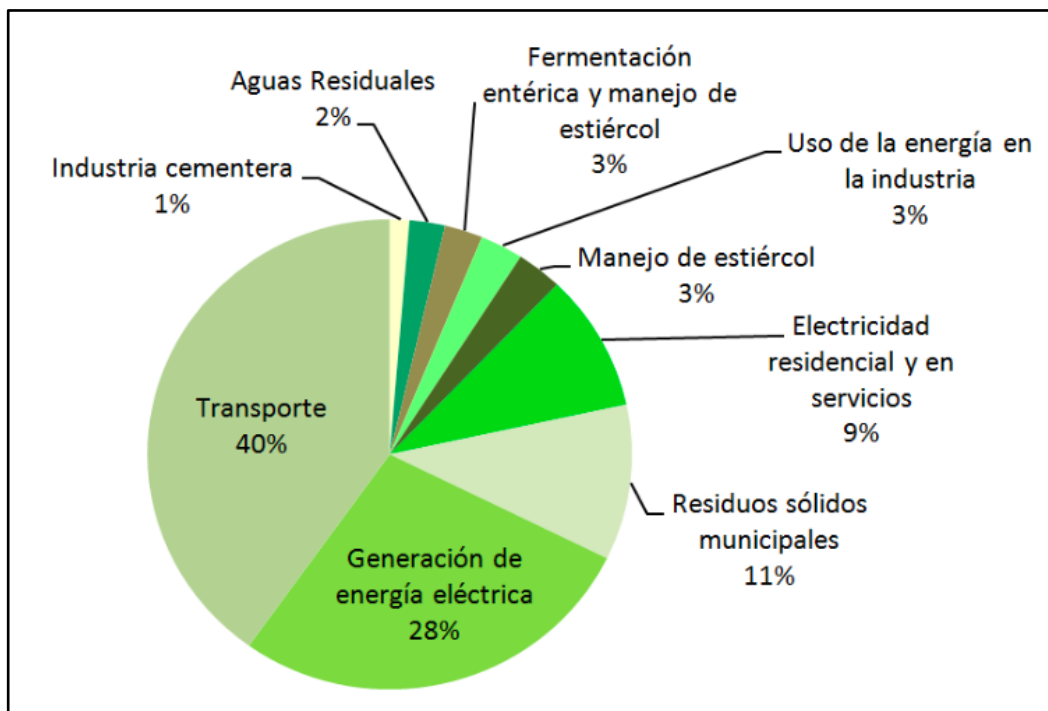


Figura 1. Principales rubros aportadores de las emisiones GEI en la entidad (Centro Mario Molina, 2008).

Ya que la ciudad de Mexicali es una ciudad fronteriza, la cual comparte factores de estudios con Estados Unidos de América en cuestión de calidad del aire, por lo tanto, es importante enfatizar en la tendencia que tiene Estados Unidos de América en cuanto a los diferentes sectores de Emisiones de GEI.

En 2015, las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes del transporte representaron alrededor del 27% del total de emisiones de gases de efecto invernadero en los Estados Unidos de América, lo que la convierte en el segundo mayor contribuyente de las emisiones de gases de efecto invernadero en EEUU después del sector eléctrico. En términos de la tendencia general, de 1990 a 2015, las emisiones totales de transporte aumentaron debido, en gran parte, a una mayor demanda de viajes (Delgado et al, 2011).

Por otra parte, se han realizado diversos estudios relacionados con la problemática vial, a través de los cuales se ha obtenido información relativa a flujos vehiculares en diversos puntos de la ciudad, como son volúmenes, clasificación, horarios de saturación, etc. y se han identificado las vialidades con mayor volumen vehicular.

La recopilación y el análisis de la información relativa al tránsito, parque vehicular, inventario del sistema vial, aspectos socioeconómicos de la región, reglamentación existente, los planes de desarrollo vigentes, los estudios viales y urbanos, generación y distribución de viajes, complementando con encuestas y aforos, permitirá elaborar un modelo ambiental, revisando la viabilidad funcional y realizando una selección óptima de alternativas.

En México, para la clasificación de vialidades urbanas se considera una combinación de parámetros cuantificables objetivamente, como ancho de sección, número de carriles, la presencia o no de camellón (franja separadora central), los volúmenes vehiculares que soportan y su función dentro de la estructura vial, de acuerdo a lo anterior, clasifica a las vías en:

1. Primarias
2. Secundarias
3. Locales
4. Accesos a colonias

En las redes urbanas un viaje típico normalmente implica desplazarse por una serie de tramos y enlaces, iniciando con calles locales y de acceso, donde la velocidad es baja, continuando con vialidades de acceso restringido o con velocidades más altas regresando al final del viaje a las calles locales (FIMEVIC, 2001).

1.1. OBJETIVO GENERAL:

Adaptar, validar e implementar mediante simulaciones un modelo en una vialidad primaria de Mexicali, generando escenarios (tendencial y mejorado), con la incorporación de variables de impacto como el rendimiento vehicular, consumo de combustible y kilómetros recorridos, considerando mejoras tecnológicas y de cambio en la estructura de crecimiento del autotransporte, para comprobar la disminución del impacto de emisiones del transporte, por causa de los gases efecto invernadero, con una proyección al año 2039.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Recopilar información de planes, programas y leyes existentes sobre el flujo vial en las principales vialidades de la ciudad de Mexicali.

- Identificar el esquema vial principal y proponer adecuaciones.
- Determinar el tipo específico de variables y parámetros viales requeridos para trabajar el modelo.
- Determinar la cantidad de emisiones de CO₂ equivalente emitidas en la vialidad de estudio, con fines de visualización de su efecto sobre el calentamiento global y la salud.
- Elaborar un modelo que cuantifique los efectos de los gases efecto invernadero (GEI) por causa del flujo vehicular de la ciudad de Mexicali.
- Validar el modelo de cálculo de GEI por causa del tránsito de Mexicali.
- Evaluar las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) con escenario tendencial y propuestas de adecuación vial (mejorado).
- Realizar las respectivas conclusiones en base a los resultados y así mismo la discusión de las proyecciones futuras.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1 Justificación

En la actualidad la movilidad vial se refiere tanto a la demanda de viajes que requiere una población creciente y con empleos, viviendas y accesos a educación, cultura y comercio, cada vez más distanciados entre sí, y por otro lado, a la oferta de infraestructura vial de avenidas y calles, con sus intersecciones, así como a los diversos servicios que se utilizan para realizar los viajes, desde el auto particular, el transporte público de mediana y gran capacidad, como los autobuses, y una creciente dotación de transporte concesionado como los taxis, llamados modos de transporte.

Los problemas en el flujo vial que son generadores de molestias cotidianas y masivas, son un síntoma de un malestar más profundo: el modo desordenado en que ha crecido nuestra ciudad, con graves riesgos para la sustentabilidad de la vida de la ciudad de Mexicali. Es por tal motivo que se hace esta propuesta para evaluar la eficacia de las medidas para aumentar el rendimiento en la

movilidad del flujo, contrarrestando a sus efectos para corregir o aumentar los desequilibrios del crecimiento urbano.

Es muy importante mencionar que el flujo vial es un problema grave ya que ocasiona un deterioro ambiental, el cual es considerable y es necesario que sea estudiado para tener una visualización transparente de la situación actual y el problema por el que se está pasando, ya que no existe hasta ahora un monitoreo el cual sea veraz y que pueda predecir o pronosticar situaciones en un horizonte de tiempo para poder realizar acciones de mejora en pro del vínculo que se tiene con el rendimiento y las emisiones que en sus actividades se generan, igualmente evitar la escases de información o de datos que den un punto de apreciación buena o mala para la toma de acciones.

El problema del transporte es un problema que ha concernido al hombre mucho antes, incluso, de la llegada del automóvil; pero ha sido en años recientes que el tema de los congestionamientos viales ha adquirido una mayor importancia. Hoy en día, el constante aumento de vehículos en la infraestructura vial y la mala planificación de las vías de transporte han propiciado congestionamientos en varios puntos de la mancha urbana, y los embotellamientos de vehículos se han convertido en uno de los grandes problemas que hay que afrontar a diario; aunado a esto se tienen otras repercusiones tanto en la calidad de vida de las personas como en el medio ambiente, por mencionar algunos se encuentran el aumento en los costos de operación de los vehículos (gasolina, mantenimiento, etc.), incremento en el número de accidentes, aumento de la emisiones de agentes contaminantes, presencia de estrés en los conductores y agravamiento de la calidad del aire.

Como lo señalan en su artículo Solís y Sheinbaum: las ventas anuales de vehículos nuevos, la entrada de vehículos usados desde Estados Unidos y la tasa de desecho vehicular son los principales fenómenos que definen el cambio en la población de vehículos. En 2010, los vehículos subcompactos y los compactos representaron la mayoría del mercado de los automóviles nuevos (36 % y 33 %, respectivamente). Sin embargo, la venta de camionetas muestra una tasa media anual de crecimiento (TMCA) mayor a la de los demás segmentos (Tabla 2). En promedio, la población de vehículos en México crecerá en el

periodo de 2010-2050 con una TCMA de 4.5 %, pasando de 25.6 millones en 2010 a 87.6 millones en 2040 y a 151.7 millones en 2050. El índice de motorización cambiará de 145 en 2010, a 350 en 2040 y a 601 en 2050. Como comparación, en 2010 los Estados Unidos de América tuvieron un índice de motorización de 797 automóviles por cada 1000 habitantes, la comunidad europea 593 y los países de ingreso medio-alto, a los que pertenece México, 98 (Solís y Sheinbaum, 2015).

Tabla 2. Tasas Medias Anuales de Crecimiento (TMCA) de las ventas y de la población vehicular (Solís y Sheinbaum, 2015).

SEGMENTO	TMCA DE VENTAS (%)	SEGMENTO	TMCA DEL PARQUE VEHICULAR (%)
Motocicleta	7.6	Taxi	3.4
Subcompacto	5.6	Camión ligero	4.4
Compacto	4.2	Autobús interurbano	3.4
Deportivo	2.7	Autobús urbano	1.0
Lujo	6.2	Camión pesado urbano	2.9
Camioneta	7.7	Camión pesado interurbano	2.3
		Tractocamión	4.8

El crecimiento de la flota de vehículos, la escasa mejoría en los rendimientos de combustibles y el bajo desarrollo del transporte público, son las causas principales del aumento en el consumo de combustibles y en las emisiones de CO₂. En 2010 el vehículo particular representó 62% del parque, seguido por el camión ligero con 28%. Si en 2050 estos dos segmentos bajan su participación, lo harán porque las motocicletas están creciendo a un ritmo impresionante. En cualquier caso, los automóviles, motocicletas y camiones ligeros son prácticamente en todo momento 95% de la población vehicular (Tabla 3). Al interior del conjunto de vehículos a gasolina, los compactos y subcompactos, hasta ahora con la mayor participación, serán superados en 2040 por la camioneta (Figura 4). Esto es trascendente para el consumo de combustibles y para las emisiones de CO₂ porque las camionetas tienen, en general, rendimientos de combustible menores (Solís y Sheinbaum, 2015).

Tabla 3. Estructura de la población vehicular en México en 2010 y 2050 (Solís y Sheinbaum, 2015).

MODO	2010	2050
Automóvil privado	62.2%	58.5%
Camión ligero	27.9%	25.0%
Motocicleta	4.5%	13.2%
Taxi	2.0%	1.3%
Tractocamión	0.8%	0.9%
Camión pesado urbano	1.4%	0.7%
Camión pesado interurbano	0.5%	0.2%
Autobús interurbano	0.3%	0.2%
Autobús urbano	0.5%	0.1%
Total (miles)	25 738	151 810

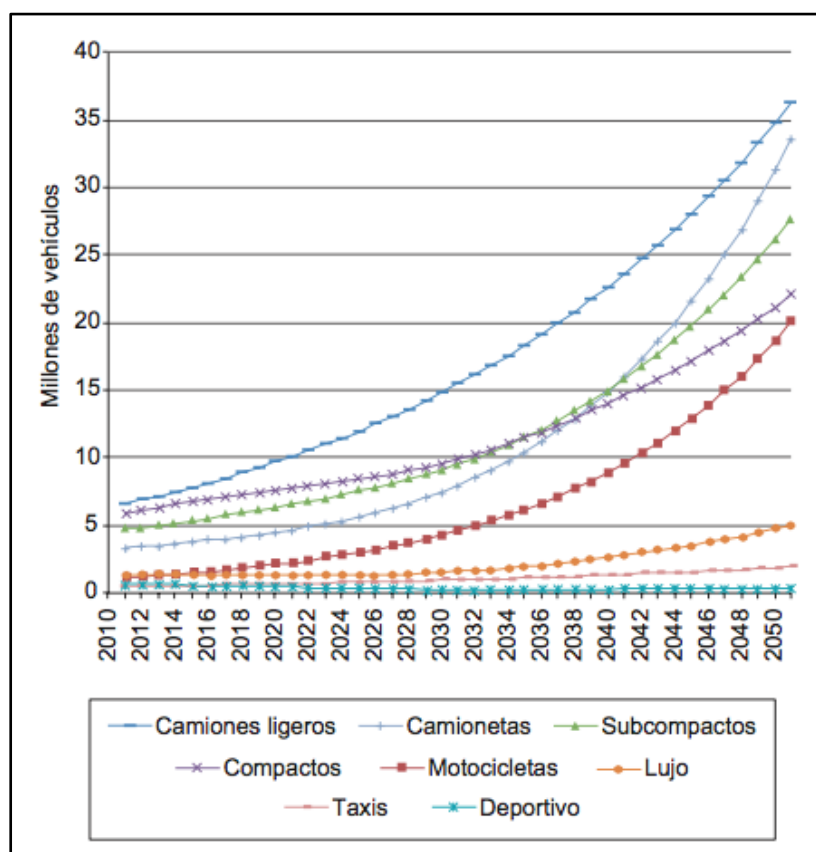


Figura 4. Evolución de la flota de vehículos a gasolina (Solís y Sheinbaum, 2015).

Debido a las altas tasas de ventas de los vehículos particulares y a su baja tasa

de desecho, la flota tendrá una edad promedio menor a la actual, situación que deberá aprovecharse en el diseño de las políticas de reducción de consumo de combustibles y de mitigación de emisiones de CO₂. Se podrían establecer, por ejemplo, normas estrictas y de largo plazo que incidan en un aumento sustancial del rendimiento de combustible de los vehículos.

Por lo tanto para el nivel que tenemos como ciudad fronteriza, es todavía más relevante el estudiar este tipo de movimientos y caracterizarlos por medio de un modelo que se genera a partir de los tipos de movilidad actuales, cantidades en factores de emisiones, y cada variable o parámetro que marque un punto de referencia para la obtención de mejoras en pro de la disminución de las emisiones de GEI, y poder extrapolar o extender el modelo a nivel frontera en las ciudades de mayor demanda en cuanto a movilidad de flujo vial.

Debido al crecimiento poblacional y la cantidad de automóviles por habitante descontrolado, la ciudad Mexicali., se encuentra en una situación crítica en cuestión de congestionamiento vehicular principalmente en las horas pico por los turnos de la mañana, tarde y noche. Sin embargo, expertos afirman que el lapso de tiempo de estas horas picos se incrementará cada vez más debido a la acumulación excesiva de automóviles dentro de un carril sobre las avenidas principales de la ciudad (Bull, 2003).

El elevado número de automóviles en Mexicali, así como la densidad vehicular e importancia de los viajes, son fenómenos cuyos antecedentes se remontan a los años cuarenta y cincuenta cuando la ciudad se encontraba aislada respecto al centro del país, sobre todo por la distancia de 3000 Km a la capital mexicana y la escasa comunicación resultante, mientras se generaban mayores vínculos económicos con el sur del estado de California, Estados Unidos de América. Esta situación explica dos aspectos fundamentales: por un lado, la tendencia de la población hacia el uso del automóvil, y por otro, la práctica generalizada de la importación de vehículos de reúso en buenas condiciones, dada la cercanía de un amplio mercado de este tipo de bienes, las facilidades para su adquisición y el bajo costo.

La ciudad dispone de una infraestructura vial que se desarrolló a partir del centro tradicional y la primera garita de cruce fronterizo internacional de la ciudad,

además de contar con vías principales que unen a esta zona con los núcleos de población que se desarrollaron hacia el sur, este y oeste, siguiendo un patrón semiconcéntrico en su organización urbana. La mayoría de los usuarios del sistema vial y de transporte en Mexicali son automovilistas, quienes realizan recorridos en vehículos propios.

En la ciudad de Mexicali existen tres grandes vialidades: el Bulevar Adolfo López Mateos destaca por un mayor flujo vehicular y se identifica como un eje que atraviesa a la ciudad de noroeste a sureste, donde se producen embotellamientos debido en gran medida a su función principal de comunicar a una gran zona habitacional e industrial que se ubica al sureste, con dos grandes núcleos urbanos como son el centro, junto a la garita internacional, y el centro cívico y comercial.

La Calzada Manuel Gómez Morín (antes periférico oriente) es otra de las principales vialidades de la ciudad que comunica a grandes zonas habitacionales, industriales y comerciales de la parte este de la ciudad, e inicia en el Bulevar Adolfo López Mateos y termina en la línea internacional en un entronque con la Avenida Cristóbal Colón.

El Bulevar Lázaro Cárdenas es otro de los ejes importantes que atraviesan la ciudad, en el sentido este-oeste, donde existe un gran flujo y en cuyos extremos se conectan las carreteras que comunican con las ciudades de Tecate y Tijuana en el extremo oeste, y la carretera a San Luis Rio Colorado, Sonora, en el extremo este, además de ser la principal vialidad de la ciudad que recibe el tránsito proveniente del valle de Mexicali (UABC, 2001).

En cuanto a su territorio, la superficie urbana de Mexicali es de 20,633 Has., mientras que la zona urbana ocupada consta de un área de 14,865 Has., en los últimos años, el crecimiento de la mancha urbana fue de 13.9% entre 1990 y 1997 y de 11.56% de 1994 a 2004 (UABC, 2001).

En cuanto a usos de suelo, en la superficie urbana de Mexicali se encuentran identificados diversos tipos, entre los que destacan el uso de suelo habitacional con 56.86%, mientras que el 16.25% se encuentra ocupado por vialidades, derechos de vía y cuerpos de agua, sin embargo, 2800 Has. corresponden a

terrenos baldíos, lo que representa el 13.54%, en la Figura 5 se pueden observar los principales usos de suelo de la ciudad de Mexicali (USEPA, 2015).

USOS DEL SUELO	SUPERFICIE	
	AREA URBANA (HAS)	%
Habitacional	8,452	56.86
Comercio y servicios	821	5.52
Industria	900	6.06
Equipamiento	909	6.11
Área verde	299	2.01
Almacenamiento y servicios	68	0.46
Mixto	134	0.90
Corredor Urbano	592	3.98
Infraestructura	91	0.61
Vialidades principales, derechos de vía y cuerpos de agua	2,415	16.25
Conservación	184	1.24
Sup. Urbana ocupada	14,866	100.00
Rustico	1,085	5.25
Grandes baldíos urbanizados	2,793	13.54
Grandes Baldíos no urbanizados	1,890	9.16
Superficie disponible	5,768	27.95
Superficie Total=	20,634	100.00

Figura 5. Distribución de usos del suelo (USEPA, 2015).

A pesar que los problemas de movilidad en las ciudades son claros, las posibles soluciones a estos son contradictorias y se encuentran en etapas prematuras, es aquí donde destaca el importante papel de la investigación. Construir simplemente más caminos no es la solución, y como lo enuncia Álvarez (2014) en el libro, su ley fundamental del congestionamiento en autopistas: «la demanda latente se expande para ocupar el espacio creado siempre que se mejora la

capacidad de las carreteras». Un ejemplo de esto se puede encontrar en la paradoja de Braess (2005) para el tránsito vehicular, la cual menciona: «ampliar una red vial causará una redistribución del tránsito vehicular que resultará en mayores tiempos individuales de viaje», dicho de otra forma, conductores individuales no coordinados siguiendo sus estrategias óptimas personales no siempre logran el estado más benéfico para el tráfico en su conjunto.

Es por ello que surge la necesidad de estudiar y desarrollar un modelo concerniente al flujo de tránsito vehicular que permitan entender las causas y consecuencias de los fenómenos que en éste se presentan, y a su vez, permitan contar con estrategias para la toma de decisiones y así prevenir y/o minimizar los congestionamientos vehiculares y por ende las emisiones contaminantes.

Por lo tanto, aunado al flujo vehicular y en conjunto con los sistemas de transporte de Mexicali, se necesitan evaluar ciertos factores que nos estén generando exceso de emisiones de gases efecto invernadero, provocados por el mismo tráfico vehicular, pero en este caso en particular las ocasionadas por unidades móviles que transiten por las líneas primarias de estudio, que se analizará con la finalidad de mejorar el traslado y brindándole al medio ambiente una disminución de emisiones a futuro, obteniendo de dicho estudio un modelo el cual evalúe las características más importantes del medio de estudio así como el cálculo de factores e índices relacionados con las emisiones GEI y a partir de este poder proponer estrategias de mejora o escenarios mejorados; para lo cual se tomará como base, el modelo para el sector transporte terrestre, el cual es un submodelo del modelo de GEI de Baja California, elaborado en el Plan Estatal de Acción Climática de Baja California, Figura 6 (PEACC, 2013).

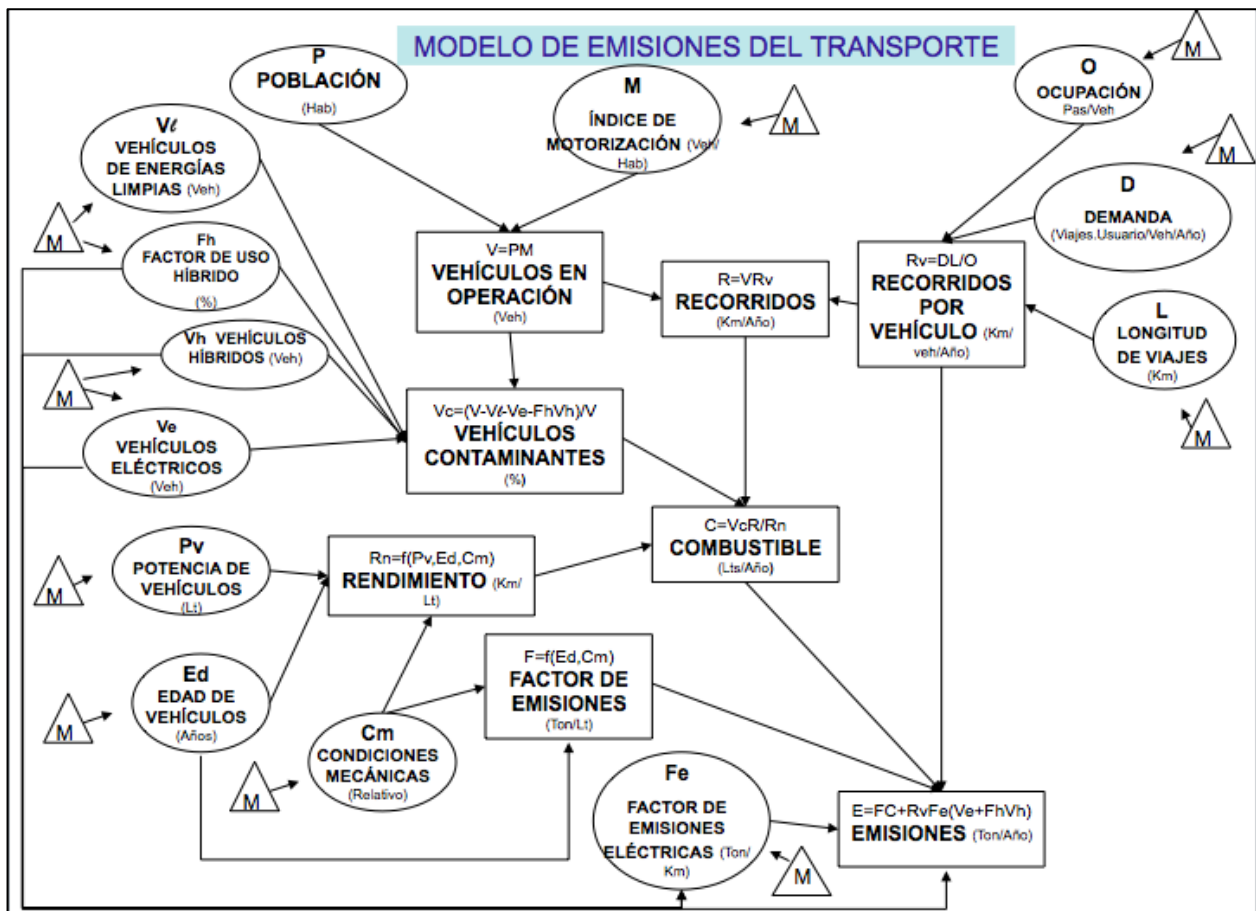


Figura 6. Modelo de Emisiones del Transporte (PEACC, 2013).

En la Figura 6 se muestran las 21 variables utilizadas para la obtención del efecto en el ambiente causado por las emisiones de GEI, las cuales pueden ser independientes o de alimentación de datos (enmarcadas en óvalos) o dependientes o de cálculo de algún efecto (enmarcadas en rectángulos), para estas últimas se muestra el algoritmo utilizado, así como las unidades trabajadas, la relación entre variables se muestra con las flechas indicadas. La utilidad del modelo es que, definidas las variables y sus interrelaciones matemáticas, se obtienen las emisiones generadas a causa de las diferentes unidades móviles utilizadas en los traslados diarios en la ciudad de Mexicali, de tal forma que se puede experimentar la aplicación de cambios en las variables para conocer el comportamiento de las emisiones (valoración de propuestas) o bien los posibles efectos de la acción de mitigación propuesta, y así poder validar la idea de mejoras que influyan en la disminución de emisiones de GEI.

Es muy importante considerar en primera instancia que por cuestiones internas de la investigación tal vez se mueva un poco el flujo del modelo, incluso se hará

la eliminación de algunas variables que no son compatibles con el objetivo de la investigación como la variable de “grado de deterioro ambiental”, y en segunda estancia que será de vital importancia para llevar a cabo el modelo, la actualización de la mayoría de las variables, así como su contabilización e incluso la extrapolación de algunas de ellas por motivos del tiempo de estudio.

1.3.2 Alcances

Se realizó un estudio exploratorio sobre el flujo de las principales vialidades, analizando opciones de mejora en la evaluación de las emisiones que se generan. Esquemmatizando la zona urbana de Mexicali para limitar el modelo a una de vialidades primarias (Blvd. Lázaro Cárdenas), en una extensión de 11.4 km, haciendo la simulación para la obtención de los gases efecto invernadero (GEI) en un horizonte de planeación a 20 años.

1.3.3 Hipótesis

“El modelo ambiental propuesto, considerando su adaptación de mejora de flujo vial continuo con respecto al rendimiento, muestra que habría una reducción significativa en las emisiones, lo que conlleva a una atmosfera más saludable para Mexicali”.

2. ANTECEDENTES

Un nuevo problema que surgió en el siglo XX es cómo organizar el tráfico por carretera para que los beneficios completos de nuestra mayor movilidad puedan disfrutarse al menor costo en la vida y el capital humano. El problema tiene muchos aspectos: contractual, legal, educativo, administrativo. Pero más recientemente, ha habido una tendencia creciente a adoptar métodos científicos y tratar de evaluar los méritos relativos de diferentes líneas de ataque mediante experimentos controlados (Lighthill et al, 1955).

Las técnicas de medición de variables relevantes al flujo vehicular han evolucionado al paso de la tecnología; así, los primeros datos disponibles se deben a Greenberg, quien reporta datos de velocidad, avance (headway), densidad y flujo de autos en el túnel Lincoln de NY y la avenida Merrit en Connecticut. Los datos colectados por Greenberg y Daou fueron tomados con una máquina de tiempo Simplex Productograph a lo largo de la avenida, con un

observador al inicio y otro al final del tramo de observación. La máquina fue programada para grabar el tiempo en el que un vehículo pasaba por cada punto de observación. De esta manera se midieron el tiempo de tránsito de un vehículo a través de la zona y el headway entre vehículos sucesivos. Se calcularon también velocidades promedio (rapidez espacial media) y flujo para todos los vehículos en iguales períodos de tiempo.

En las primeras teorías de flujo vehicular se buscaban relaciones independientes del tiempo, entre las variables fundamentales. Se reconoció rápidamente la importancia de la relación flujo–densidad (relación fundamental) y todas las teorías se contrastaron con el tipo de predicción de la relación fundamental. B.D. Greenshields (1935) fue uno de los primeros en realizar un estudio experimental del tráfico vehicular midiendo directamente flujo (vehículos/hr) y velocidades. Realizó un ajuste lineal a 7 datos de velocidad-concentración (Crawford et al, 1999).

Debido a su nivel de importancia y al potencial que tiene el sector del transporte para el desarrollo de alternativas de mejora en pro del medio ambiente, surge la necesidad de estudiar diferentes alternativas para disminuir las emisiones que este provoca. Por ejemplo, (Zhan et al, 2018) mediante la estimación de las emisiones de CO₂ del tráfico en carretera e investigación con el método de desacoplamiento de las emisiones de CO₂ del tráfico; brindando apoyo científico para lograr la mitigación de las emisiones de CO₂ en el sector del transporte. En contraste, (Sun, 2022) se enfocó en disminuir la congestión vehicular y disminuir la densidad del tráfico a partir de un método de modelación dinámica mediante un modelo de programación entera basado en una red de espacio-tiempo para el servicio de transporte urbano.

Las primeras leyes contra la contaminación del aire fueron efectuadas por el congreso norteamericano en California; en las audiencias de 1963 se consideró a las emisiones de los automotores como responsables de cerca del 50% de los problemas nacionales de la contaminación del aire. Constituye, en muchos aspectos, la fuente más importante y crítica de la contaminación del aire, y sin duda aumenta su gravedad a pesar de los esfuerzos preliminares y aislados para controlarla (USEPA, 2015).

2.1. Características urbanas de Mexicali.

Mexicali es la capital del Estado de Baja California y forma parte de la zona metropolitana, está asentada en una topografía plana, se localiza en las siguientes coordenadas geográficas: al Norte 32.55° 115.47° al Oeste y 4 metros sobre el nivel del mar (García et al, 2013) (Figura 7); la población del Municipio de Mexicali es de 1, 049, 792 habitantes (INEGI, 2020).

El clima predominante, de acuerdo a la clasificación de Köppen, es del tipo BW seco desértico en su variante fría. Lo que quiere decir que es un clima seco y caliente, con temperaturas extremas durante el verano y el invierno. La temperatura media anual es de 21°C a 23°C , pero en el verano, en los meses de junio a septiembre la temperatura media máxima es superior a 30°C . En junio, es el mes más caluroso, con temperatura media máxima de 41°C a 43°C . El mes de enero es el mes más frío, la temperatura media mensual es de 11°C a 14°C . Se han registrado grandes contrastes térmicos en Mexicali, con temperaturas tan altas como 54.3°C , y tan bajas como -7.0°C (ProAire, 2011).

El proceso de expansión urbana producido por el contexto económico en el que está inmersa la ciudad, se traduce en incremento de asentamientos humanos en forma de colonias y la actividad industrial no contempladas en la planeación del desarrollo urbano, acumulando déficit en el sector hidráulico, de vivienda, vialidad y transporte, y especialmente en el sector ambiental, provocando mezclas de usos urbanos incompatibles que crean una gran variedad de riesgos potenciales y situaciones conflictivas para la población residente y las infraestructuras urbanas en la ciudad (ProAire, 2011).



Figura 7. Ubicación geográfica de Mexicali, Baja California, México. Fuente: Google maps.

De acuerdo al Censo de Población y Vivienda de 1990 (INEGI, 1991) y el del 2000 (INEGI, 2001; CONAPO, 2003), en 1990 el área urbana de Mexicali contaba una población de 453 mil hab.; para 1995 alcanzó los 505 mil hab. y en el 2000 la población llegó aproximadamente a 779 mil hab., distribuidos en una superficie de más de 20 mil ha, población que experimentó una tasa media de crecimiento anual (TMCA) de 3% entre 1990 y 2000, mayor a la del periodo 1980-1990 que fue de 2%. Según con el estudio de Evaluación de Niveles de Bienestar Mexicali 1998, este se debió al 40 fenómeno de expulsión de la población municipal hacia otras ciudades del estado. Conforme a los datos del Censo del 2010, la población del Municipio de Mexicali fue mayor a 936 mil hab. y para la entidad federativa de 3 millones de hab., lo que implica que un 30% de la población del estado tiene asentamiento en la Ciudad de Mexicali (ProAire, 2011).

La estructura vial de la ciudad de Mexicali está constituida por una serie de ejes principales y secundarios que enlazan a un conjunto de calles y avenidas, generalmente trazadas en dirección norte-sur y este-oeste sobre una región prácticamente plana, formando una mancha urbana casi continua. Se puede decir que existen zonas muy consolidadas y con infraestructura suficiente, ubicadas en el centro y norte de la zona urbana, también existen áreas con déficit

de infraestructura como son los centros habitacionales que se encuentran en la periferia este, oeste y sur de la mancha urbana.

Las vialidades que se encuentran clasificadas como principales en esta ciudad son: Ave. Colón, Blvd. Abelardo L. Rodríguez, Calzada Justo Sierra, Blvd. Benito Juárez, Corredor Urbano a San Felipe, Calzada Independencia, el par vial formado por las Av. Sonora y Av. Sinaloa, Carretera a Santa Isabel, Av. Zaragoza, Calzada de las Américas, Calzada Compuertas, Calzada Cetys, Blvd. Lázaro Cárdenas, Calzada Francisco L. Montejano, Blvd. Castellón, Blvd. López Mateos, Corredor Industrial Palaco, Blvd. Río Nuevo y Eje Central, Blvd. Anáhuac, Calle Novena Blvd. Venustiano Carranza, Blvd. Héctor Terán Terán, Periférico Oriente, Blvd. Manuel Gómez Morín, Calzada Heroico Colegio Militar (Calle 11) y Corredor Urbano a Tijuana. En cuanto a las vialidades secundarias, se tienen jerarquizadas las siguientes en dicha categoría: Calle Cuarta. Blvd., Robledo Industrial, Av. San Pedro Mezquital, Calle Río Mocerito, Calle Río Culiacán, Calzada Cuauhtémoc, Av. Reforma, Av. República de Brasil, Blvd. Lombardo Toledano, Calzada Laguna Xochimilco, Avenida Cuyutlán, Blvd. Versailles, Ocotlán, Prolongación Zaragoza, Av. Oaxaca, Calzada Yugoslavia, Av. Michoacán y Calzada Continente Europeo. En general, del total de vialidades urbanas, la proporción de las que están pavimentadas es del 60% aproximadamente (PMVT, 2011).

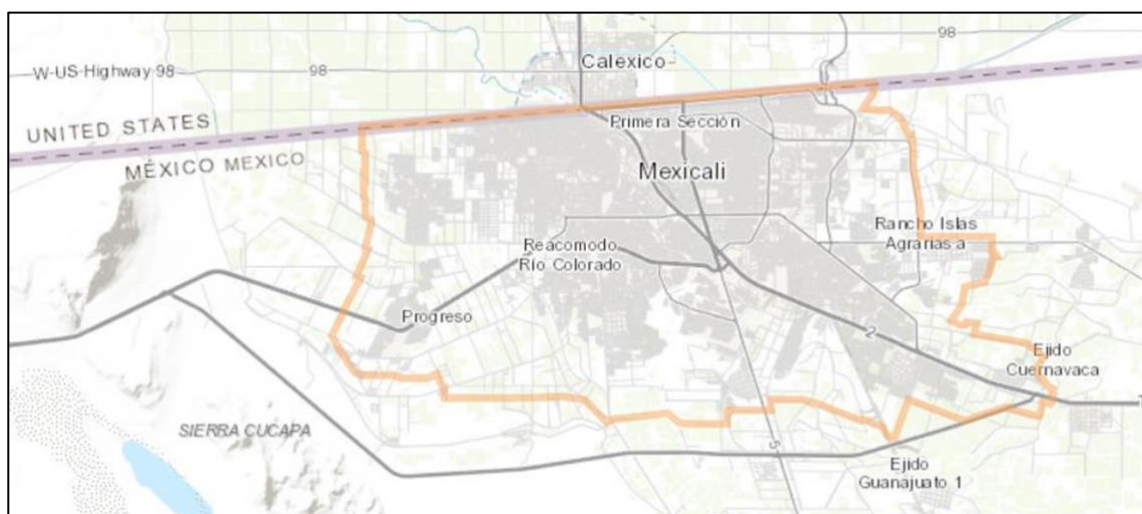


Figura 3. Traza vial e infraestructura vial del Mexicali

2.2. Calidad del aire en Mexicali.

La calidad del aire en Mexicali ha sido estudiada principalmente a partir de la presencia de partículas suspendidas en la atmósfera, también llamadas material particulado (PM), el cual está compuesto de una serie de sustancias orgánicas e inorgánicas, recibe el nombre de partículas totales en suspensión, son denominadas de acuerdo a su tamaño: PM-10, PM-5 y PM-2.5, donde el número representa el tamaño de la partícula en micrones (Bull, 2003), para lo cual existen estaciones de monitoreo que realizan la medición de dichas concentraciones en el medio ambiente de la ciudad (Molina, 2007), sin embargo, aunque tienen efectos nocivos para la salud, estas partículas no están consideradas como causantes del cambio climático, es por ello que no han sido incluidas en la presente investigación.

Autoridades de diversos niveles han implementado acciones para contrarrestar la presencia de dichas partículas en el medio ambiente como lo son el programa ProAire Mexicali 2000-2005, por parte del INE, la SEMARNAT y la participación de los tres niveles de gobierno, se buscaba diseñar e implantar acciones para controlar las fuentes contaminantes del aire en esta ciudad (Molina, 2007). Otro programa con el mismo objetivo es el denominado Programa Integral de Pavimentación y Calidad del Aire (PIPCA) implementado por el Gobierno del Estado de Baja California, pues existe una estrecha relación entre la exposición a altas concentraciones de partículas de polvo suspendidas en el aire y la incidencia de enfermedades respiratorias las cuales, de acuerdo con el Instituto de Servicios de Salud Pública del Estado de Baja California, han ido en aumento. La generación de polvo se debe principalmente al tráfico que circula por caminos sin pavimentar, factor que constituye más del 60% del inventario total de PM-10, para resolver este problema, el Estado de Baja California emprendió un programa de pavimentación a gran escala entre los años 2003 y 2007 (NADB, 2011).

En Mexicali existe una diversidad de fuentes generadoras de contaminantes clasificadas como fuentes de área, dentro de las cuales destacan por su cantidad emitida: los vehículos, adicionalmente a la contaminación provocada por la quema de combustible al circular, constituyen la fuente generadora más importante debido, en primer término, a que el parque vehicular se considera

obsoleto y con deficiencias en el mantenimiento; en segundo lugar, a su paso por las calles no pavimentadas y pavimentadas levantan gran cantidad de partículas; y, por último, la acumulación y paso lento en la zona centro de la ciudad para cruzar la frontera y los autobuses urbanos que finalizan e inician ahí sus rutas.

Mexicali es una zona con muy baja precipitación pluvial, con alrededor del 40% de calles no pavimentadas, lotes baldíos diseminados por toda la mancha urbana, por lo cual se tienen altas emisiones de partículas de polvo por efecto de los vientos (INE-Mexicali, 1999).

En lo que respecta a los gases efecto invernadero, se han realizado inventarios de emisiones contaminantes como el realizado en 1996 por la empresa Ingeniería en Control Ambiental y Riesgo Industrial, S. de R. L. M. I., en el cual se estudiaron los siguientes contaminantes: PM-10 (partículas menores de 10 micras), SO₂ (bióxido de azufre), CO (monóxido de carbono) NO_x (óxidos de nitrógeno), Pb (Plomo) y NH₃ (amoníaco) provenientes de diversas fuentes, en dicho estudio se encontró que, en la ciudad de Mexicali, son los vehículos automotores la principal fuente de emisión de contaminantes a la atmósfera (ProAire, 2011).

En el año 2005 se llevó a cabo el inventario de gases efecto invernadero del Estado de Baja California, por el Centro Mario Molina para el Gobierno del Estado, el cual se apegó a la guía del IPCC para la realización de este tipo de estudios, considerando las fuentes fijas de combustión como la industria manufacturera y la generación de electricidad, las fuentes móviles como el transporte terrestre y aéreo y los sectores residencial, comercial y agropecuario. El cálculo de los contaminantes fue realizado con la información obtenida de la Secretaría de Energía (SENER) y por Petróleos Mexicanos (PEMEX) sobre las ventas de combustibles correspondientes al año 2005, sus resultados fueron reportados en 2007. Este estudio se realizó en forma global para el Estado de Baja California, por lo que no se cuenta con datos desagregados para cada una de las ciudades que lo integran (INEGEI, 2006).

En resumen, la ciudad de Mexicali es una ciudad fronteriza con los Estados Unidos de América, con topografía plana y traza vial reticular, donde el parque

vehicular ha aumentado en los últimos años, así como la proporción de viajes que se realizan en la modalidad del uso del automóvil particular, a pesar de ello, la calidad del aire no ha sido estudiada desde el cálculo de GEI a nivel local.

Por lo cual es importante mencionar que el monitoreo directo de la fuente emisora (en este caso el vehículo), es un enfoque claro y muy utilizado; la principal ventaja del monitorear de manera directa las emisiones, es la precisión de los resultados del inventario. No obstante, en el contexto de los estudios de manejo ambiental, este método puede demandar demasiado tiempo y recursos e incluso ser poco práctico para áreas de estudio más complejas.

El monitoreo de las emisiones liberadas por el tubo de escape de los vehículos es aún más difícil, ya que la tasa depende de parámetros como la velocidad del vehículo, la carga del motor y el estado de precalentamiento, que hacen que la tasa de contaminación sea variable. Además, gran parte de las emisiones, la que se evapora, no se libera a través del tubo de escape y la mayor parte ni siquiera es liberada mientras el vehículo está en marcha. En este caso, es difícil realizar una medición constante de las emisiones, aunque se trate de un solo vehículo y, obviamente, es aún menos práctico si se tratara de una flota de vehículos (Alexander, 2002).

2.3. Estudios previos

El Programa para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire) de Mexicali 2000-2005 representa el esfuerzo conjunto de la sociedad, del sector económico local y de las autoridades mexicanas y estadounidenses para diseñar e implantar un conjunto de acciones con la finalidad de mejorar la calidad del aire de la región. De la implementación de este Programa se enlistan los logros alcanzados:

- Incorporación de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire a la Administración del Estado de Baja California. El 24 de junio de 2004 se firmó en Tijuana, Baja California el acuerdo de colaboración entre la SEMARNAT y la USEPA para la transferencia de la Red de Monitoreo de Mexicali, Tijuana, Tecate y Rosarito para el año 2006. Cuando los monitores de calidad del aire iniciaron su operación en 1997 fueron administrados y financiados por la USEPA. Desde junio del 2007 el

Gobierno del Estado ha tomado la red bajo su administración. La información al público sobre el estado de la calidad del aire es en tiempo casi real, se muestra el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) de todos los contaminantes, además de recomendaciones para proteger la salud de la comunidad en caso de un aire no saludable.

- Desarrollo de un estudio integral y mejora del transporte público. La municipalidad de Mexicali ha mejorado su sistema de transporte después de varios estudios que se han llevado a cabo tales como: el estudio integral del tránsito y transporte urbano en 2002; la determinación de las nuevas rutas de autobuses en 2004; la actualización del tránsito y sistema de transporte público de Mexicali en el 2007. Todavía hay 400 autobuses viejos del tipo escolar que circulan por la ciudad, que se usan para el transporte de personal de la industria maquiladora (ProAire, 2011).
- Programa Integral de Pavimentación y Calidad del Aire (PIPCA). A nivel estatal el PIPCA, ha sido aplicado a los cinco municipios del Estado. Este proyecto está a cargo de la Junta Urbana de Mexicali que es parte de la Secretaría de Infraestructura y Desarrollo Urbano (SIDUE). Se hizo un cálculo tomando en consideración factores de emisión de ciudades en California, EUA, similares a Mexicali. Se realizó un cálculo de reducción de emisiones de material particulado por la pavimentación tomando en cuenta factores de emisiones de la USEPA.
- Inventario de emisiones de los seis estados fronterizos. El primer inventario de emisiones de Mexicali se llevó a cabo usando información de 1996. La Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA), la USEPA, la WGA y la SEMARNAT financiaron una actualización que ha sido publicado en el Inventario Nacional de Emisiones de México con información base de 1999 que incluyó a los seis estados fronterizos mexicanos (ProAire, 2011).

Se han realizado diversos estudios en los que, de una forma directa o indirecta, se refieren a la problemática vial y del transporte de la ciudad de Mexicali, entre los más recientes:

- Determinación de un Sistema de Rutas de Transporte Público para la Ciudad de Mexicali (Galindo et al, 2003).
- Modelo de Transporte Público de la Ciudad de Mexicali.
- Estructura Troncal de Rutas de Transporte Público de Mexicali Acorde a sus Necesidades de Viaje.
- Determinación de Volúmenes de Tránsito en Libramiento Mexicali.
- Obtención de Patrones de Movimiento de Transporte Público de la Ciudad de Mexicali Acorde a Necesidades de viaje (Galindo et al, 2002).
- Flujos de Tránsito Vehicular de la Ciudad de Mexicali.
- Atlas de Tránsito Vehicular de la Ciudad de Mexicali, realizado en el año 2000 (Hernández et al, 2000).
- Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Mexicali, B. C. 2010 (Reyna et al, 2005).
- Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Mexicali, B. C. 1993-2007.
- Propuesta de un sistema vial y de transporte para la ciudad de Mexicali, B. C. (Galindo et al, 1992).
- Esquema de Desarrollo Urbano, Ciudad de Mexicali (SEDEMA, 2008).

3. MARCO TEÓRICO

Medir es contar, comparar una unidad con otra, dar una valoración numérica, asignar un valor, asignar números a los objetos. Todo lo que existe está en una cierta cantidad y se puede medir. Estos números no se asignan de forma arbitraria, sino que se rigen por ciertas reglas, se establece un sistema empírico y éste da lugar a un sistema formal. La necesidad de medir es evidente en la mayor parte de las actividades técnicas o científicas. Sin embargo, es importante no sólo contar con medidas sino también saber si dichas medidas son válidas. Para ello se debe recordar la definición de medición como “el proceso por el cual se asignan números o símbolos a atributos de entidades del mundo real de tal

forma que los describa de acuerdo con reglas claramente especificadas”. La medición de los atributos o estado que guarda el aire ambiente se conoce como medición de la calidad del aire. Dicha medición se puede llevar a cabo por medio del muestreo, análisis y el monitoreo de dicho aire ambiente (INE, 2017).

En tanto que, en gran parte, la investigación hace uso de la medición como parte fundamental de la recolección de información para el modelo ambiental enfocado en el flujo vehicular como fuente emisora, y se tomaran las mediciones correspondientes a la necesidad del modelo tomando como base el sistema vial urbano de la ciudad de Mexicali.

El sistema vial urbano es el sistema circulatorio de la ciudad. En efecto, la estructura urbana, se compone de la disposición del suelo con diferente uso, ligado o comunicado por las vías o calles que permiten su relación. Por tanto, su diseño es fundamental.

La vialidad vehicular se diseña en función de los siguientes elementos básicos:

- Vialidad
 - Vialidades continuas
 - Aforos
 - El tipo de vehículo.
 - La velocidad del vehículo.
 - La frecuencia de uso.
 - La topografía del terreno, etc.
-
- Vialidad: Faja de terreno acondicionada para facilitar el tránsito vehicular y peatonal.
 - Vialidades Continuas: Vialidades que permiten la circulación de gran cantidad de vehículos a alta velocidad, no tienen acceso directo a los predios y está prohibido el estacionamiento en estas vialidades, su utilización en la ciudad tiene por objeto solucionar el desplazamiento a grandes distancias (Corral, 1989).
 - Aforo: número de vehículos o peatones que circulan por un punto dado o sección en un lapso determinado.

3.1. CLASIFICACIÓN

3.1.1. POR SU FUNCIÓN:

De acuerdo a su función, las vialidades se clasifican en:

- **Circulación:** es aquella que permite el flujo eficiente del tránsito de paso.
- **Acceso local:** es aquella que permite la entrada y salida de vehículos en las propiedades colindantes a ella, normalmente a velocidades bajas y aproximadamente perpendiculares a la misma, reduciendo la eficiencia del tránsito de paso (USEPA, 2015).

3.1.2. POR SUS CARACTERÍSTICAS:

De acuerdo a sus características, las vialidades se clasifican en (Bazan, 1998):

- **Primarias:** ejes urbanos de 6 a 8 carriles, con dos sentidos, camellón y banquetas, estacionamiento prohibido, paradas de autobuses con re metimientos.
- **Secundarias:** avenidas de doble sentido con acotamientos y banquetas, 4 carriles.
- **Locales:** calles distribuidoras de dos sentidos, dos carriles, una o dos franjas para estacionamientos y banquetas.
- **Acceso a colonias:** de uno o dos sentidos, solo tránsito local.

3.1.3. POR SU JERARQUIA FUNCIONAL:

De acuerdo a su función, las vialidades se clasifican en (Bazan, 1998):

- **Locales:** tienen como objetivo dar acceso a propiedades adyacentes, en ellas el tránsito de paso no tiene prioridad.
- **Colectoras:** enlazan a las calles locales al sistema arterial y proveen acceso local a las propiedades adyacentes.
- **Primarias:** permiten velocidades más altas al tránsito de paso, el acceso a propiedades adyacentes es permitido solo con entradas y salidas bien diseñadas.

Se entiende como flujo vehicular continuo a la característica que tiene una red vial principal de propiciar al usuario una circulación sin detenerse para brindar el cruce a los vehículos que circulan en forma transversal, es decir que esta provista de pasos a desnivel y no contiene altos ni semáforos que lo puedan detener.

El tráfico vehicular es la consecuencia de múltiples factores sociales, culturales, económicos y políticos que se presentan en las principales ciudades del mundo.

La contaminación ambiental se genera por diversos factores sin embargo a la fecha es resultado de la gran producción de partículas contaminantes de vehículos motorizados principalmente en zonas urbanas.

La movilidad urbana sustentable es un tema que hoy en día forma parte de una solución factible para los problemas que se tiene con el congestionamiento vehicular en diferentes ciudades del mundo. Muchas de estas ciudades que han logrado ejecutar diferentes estrategias inteligentes lo han logrado gracias al apoyo de los presupuestos económicos que les otorgan en sus países.

La manera de desplazarse de un punto a otro dentro de una ciudad impacta no sólo al usuario que utiliza un vehículo motorizado, sino que también involucra a los peatones que circulan por la calle. La movilidad urbana tiene como objetivo crear hábitos de transporte integrales que reduzcan el costo energético, la contaminación ambiental y los accidentes viales. La pretensión es presentar la información más relevante y significativa sobre los factores que afectan el tráfico vehicular (Delgado et al, 2011).

La rapidez con que se agudiza la congestión de tránsito en las ciudades grandes hace imperativo que las autoridades adopten un enfoque apropiado para adaptar los sistemas de transporte urbano, tanto el transporte público como el uso de los autos en las horas y áreas conflictivas (Bull, 2003).

Una primera preocupación debe ser mitigar los efectos de la congestión sobre quienes no la crean o hacen un escaso aporte a ella, para lo cual es necesario: afianzar y recuperar, donde pudiera haberlo perdido, el carácter de bien público del sistema vial, facilitando la libre circulación de quienes no contribuyen a la congestión o lo hacen en forma poco significativa.

Principalmente, se trata de asegurar al transporte público rutas expeditas, darle determinadas preferencias de circulación, y donde sean apropiados, carriles segregados para que no se vea demorado por la congestión, asegurar espacios adecuados para los peatones, mantener bajo control la emisión de

contaminantes y acotar la congestión para evitar que ponga en peligro la calidad de vida y sostenibilidad de las ciudades.

Reducir la congestión tiene también como consecuencia disminuir las emisiones de contaminantes atmosféricos, puesto que el sistema de transporte, en la mayoría de las ciudades del mundo, es uno de los principales responsables de la contaminación atmosférica. Por ello, una estrategia integrada para atacar estos dos problemas puede conducir a soluciones más eficientes que la aplicación de medidas aisladas para combatir cada uno de ellos en forma separada.

3.2. Estudios a escala local

Es importante mencionar, que actualmente hay acciones pendientes en escala local, y que han sido contempladas en el presente ProAire 2011-2020 a fin de llevarlas a buen término.

Existen fuentes muy importantes que contribuyen a la degradación de la calidad del aire en la región. Los resultados de aplicación de un modelo y los datos obtenidos durante la campañas otoño y primavera indican que las fuentes móviles contribuyen a la mayoría de las PM_{2.5} observadas en Mexicali (60%). La alta influencia de las fuentes móviles para los niveles de contaminación observados en Mexicali está corroborado por los resultados adicionales del modelo receptor que indican que la mayoría de los COV observados tienen su origen en las fuentes de emisión móviles o de la evaporación de la gasolina. Los mismos datos de los COV indican que la flota vehicular se está renovando; sin embargo, esta todavía integrada por vehículos con tecnología vieja.

Y en el mismo documento se propone la Estrategia III. Reducción de emisiones de fuentes móviles, la cual está fundamentada bajo medidas de prevención en base a diferentes problemáticas móviles que existen:

Medida 20. Impulsar la movilidad de pasajeros y carga en el municipio con una visión de integración y de sustentabilidad. Objetivo: Ofrecer a las autoridades de transporte de Mexicali una herramienta de planeación para los sistemas de transporte privado, público (carga y pasaje) y no motorizado que ayuden a mejorar la eficiencia energética general de la ciudad. El objetivo general de este plan debe ser la mejora de la calidad de vida urbana a través de la reducción del

uso del automóvil particular y la recuperación de la calle como espacio público de relación y convivencia. Justificación: El desempeño de Mexicali en materia de movilidad es pobre. Existe una interdependencia y desconexión entre los diversos sistemas de transporte y los niveles de eficiencia con el que operan; esto genera un alto impacto en los consumos energéticos que se ven reflejados en altos costos económico-sociales y contaminantes. Adicionalmente se requiere crear mayor infraestructura que involucre y permita el desarrollo de sistemas motorizados y no motorizados, así como una priorización de la jerarquía peatonal en zonas críticas para generar inclusión y mayor calidad de vida en la región.

Medida 21. Reordenar el autotransporte público de pasajeros y de carga. Objetivo: Agilizar la circulación vial, mediante la reubicación y reordenación de paradas exclusivas para el servicio de transporte público y establecimiento de rutas express de carga. Justificación: En el esquema de operación del transporte público, los operadores de las unidades realizan paradas no autorizadas. Los efectos que ocasiona sobre la circulación vehicular van desde la disminución de la velocidad, hasta la creación de congestionamientos.

Medida 22. Implementar y supervisar el programa estatal de verificación vehicular obligatorio (PVVO). Objetivo: Promover el mantenimiento preventivo y correctivo del parque vehicular, para garantizar que todos los vehículos de combustión interna que circulan en Mexicali, cumplan con la normatividad ambiental vigente. Justificación: Los vehículos que no se encuentran en condiciones óptimas de servicio o que no tienen un adecuado mantenimiento, liberan a la atmósfera emisiones contaminantes que normalmente son mucho mayores que las de aquellos que reciben un buen mantenimiento. Los contaminantes emitidos son principalmente CO, NOx y COV, debido a procesos de combustión incompleta o a la operación incorrecta de sus sistemas electromecánicos, por lo que es necesario evaluar sus emisiones periódicamente, a fin de asegurar que cuentan con el mantenimiento correspondiente.

Medida 23. Implementar un programa de detección y sanción a vehículos ostensiblemente contaminantes. Objetivo: Promover el mantenimiento preventivo y correctivo del parque vehicular ostensiblemente contaminante.

Justificación: Los vehículos que no tienen un adecuado mantenimiento, liberan a la atmósfera emisiones contaminantes que normalmente son mucho mayores que las de aquellos que reciben un buen mantenimiento. Los contaminantes emitidos son principalmente CO, NOx y COV, debido a procesos de combustión incompleta o a la operación incorrecta de sus sistemas electromecánicos, por lo que es necesario evaluar sus emisiones periódicamente para recibir el mantenimiento adecuado o en su defecto, restringir su circulación, a fin de disminuir las emisiones contaminantes a la atmósfera.

Los vehículos automotores contribuyen a la emisión de 2,675 ton/año de NOx, 5,609 ton/año de CO y 8,145 ton/año de COV en Mexicali. A partir de 2011, los vehículos registrados en Mexicali, son sujetos a un programa estatal de verificación vehicular obligatorio, sin embargo lamentablemente el programa de verificación vehicular ha estado suspendido desde 2020 por el Gobierno del Estado de Baja California; por motivos de pandemia.

Medida 26. Crear un programa coordinado para reducir las emisiones generadas por los vehículos en los cruces fronterizos. Objetivo: Reducir las emisiones contaminantes generadas por vehículos en espera en los cruces fronterizos. Justificación: En Mexicali se encuentran dos garitas dentro de la mancha urbana: la primera se encuentra en la zona centro de la ciudad con 12 carriles de circulación hacia los Estados Unidos y la segunda llamada Garita Nuevo Mexicali, se encuentra a una distancia de 12 km aproximadamente al oriente de la primera garita. Diariamente en ambos cruces fronterizos se registra una afluencia hasta de 17,000 automóviles, lo cual genera largas filas de espera que pueden durar dos a tres horas en el caso de autos de pasajeros, provocando emisiones de contaminantes como CO, COV, NOx y GEI.

Medida 27. Desarrollar un programa para reducir las emisiones de los motores a diesel en la maquinaria de construcción y de uso agrícola. Objetivo: Disminuir las emisiones contaminantes generadas por maquinaria de construcción y otras máquinas a diesel (relacionadas a agricultura, aeropuertos y plantas portátiles de generación de energía eléctrica, etc.). Justificación: Los sectores de la maquinaria para obra civil y aviación son algunos de los rubros que presentan una buena recuperación económica en México. Debido a la estabilidad

económica actual del país se realizan más construcciones de todo tipo que hace algunos años. Derivado de lo anterior la inversión en infraestructura para caminos, edificios, vivienda y aeropuertos ha crecido notablemente por lo que existe una gran demanda de equipos y maquinarias auxiliares para los cuales en el país no existe regulación alguna, y sus emisiones no son controladas (ProAire, 2011).

Así como el Protocolo de Kioto en su artículo 2, con la intención de enfatizar en el desarrollo sostenible genera una serie de acuerdos dentro de los cuales propone medidas para limitar y/o reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal en el sector del transporte.

3.3. Modelación de tráfico vehicular

Hay una serie de estudios en investigaciones en las cuales se manejan los modelos enfocados en el sector transporte, con enfoque en estudios de vialidades urbanas así como sus características para eficientizar el mismo, y con esto ayudar al medio ambiente por la emisión que esta fuente emisora provoca, por ejemplo en estudios de equipo de investigación de la compañía de General Motors, en Michigan, existe un considerable interés en la simulación del tráfico con computadoras de alta velocidad para simular el comportamiento de los vehículos en las intersecciones de carreteras. Una vez que se comprenden las características de los elementos de la red de tráfico, se espera utilizar algunas analogías entre la teoría del tráfico y la de comunicación, ya que uno de los principales problemas de un ingeniero de comunicaciones es pasar tanta información sobre un circuito dado por tiempo de unidad posible (Chandler et al, 1958).

En este sentido, cada vez son más los estudios de emisiones que trabajan con simulaciones para generar y evaluar escenarios que proyecten las tendencias asociadas al uso de energía y transporte (Pichlmaier et al, 2021) (Kraus et al, 2022). Así mismo, se cuenta con diferentes softwares de simulación que pueden ser aplicados para estimar tendencias y evaluar alternativas. Como el caso de estudio sobre la contaminación del tráfico vehicular en Calabria, una región en el sur de Italia, donde se utilizó la metodología denominada Corinair (Coordinación

de Información AIR), desarrollada por la EEA (Agencia Europea de Medio Ambiente (Mazza et al, 2020). Otro estudio aplicó un análisis de ciclo de vida al transporte, para la Unión Europea con 27 países en 2010. Se utilizó el software Simapro 8 (Paulino et al, 2018). Un estudio en Lima, evaluó de manera experimental las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) resultantes de las actividades de mejoramiento vial, así como del tránsito regular, utilizando la aplicación de software CarbonROAD (Salini et al, 2015). O el trabajo con modelos de sistemas energéticos globales (Christian et al, 2003), conocidos como E3 que trabajan problemas matemáticos y computacionales (programa o software) mediante módulos de transporte en el cual se puede evaluar variables de impacto como el consumo de combustible bajo supuestos en cantidad de emisión de CO₂ y generar escenarios de tendencia y transición de un cambio con mejoras.

Y es importante mencionar que tanto el acceso a ese tipo de programas para modelar, es bastante caro, y hay una accesibilidad muy limitada debido a la falta de recursos muchas de las veces en las investigaciones.

Las mejoras en el transporte a menudo implican esfuerzos para reducir la congestión y para suavizar el flujo de tráfico. El impacto de estas iniciativas en las emisiones está determinado por los cambios en el funcionamiento del vehículo características en la instalación mejorada. El pensamiento actual sobre las emisiones sugiere que suavizado los flujos de tráfico producirán menos emisiones que los flujos de tráfico congestionados. Aún así, se requieren modelos para generar los factores de emisiones necesarios para el enlace de la carretera en cuestión.

Por lo que se menciona que los modelos tradicionales de calidad del aire, como MOBILE, no son adecuados para la tarea de predecir cambios en los parámetros de operación del vehículo. El propósito del modelo MOBILE es el de estimar las tasas de emisión provenientes de vehículos motorizados en ruta, operando en los 49 estados de la unión americana tales como vehículos de pasajeros, motocicletas, camiones, buses y casas rodantes. El estado de California en los Estados Unidos de America ha diferenciado sus estándares de emisión y por consiguiente ha desarrollado un modelo de emisiones por separado. La flota de

vehículos utilizada en el modelo opera principalmente con diesel y gasolina, con una fracción muy pequeña de gas natural y vehículos eléctricos que también fueron incorporados al modelo (Crawford et al, 1999).

Y como muchas de las investigaciones realizadas ya lo comentan, un punto relevante en el monitoreo de emisiones, así como en su modelación, es el método de la recolección en los datos de información, por lo que no se recomienda se realice la captura de datos solo de estaciones o mediciones fijas.

Una alternativa para esto es la adopción de indicadores de tráfico (densidad de población e intensidad de tráfico) y sistema de información geográfica (SIG), especialmente cuando la exposición relacionada con el tráfico es el enfoque principal. Varios estudios han utilizado esta técnica en la evaluación de la exposición a largo plazo de partículas y otros contaminantes gaseosos, este método es adecuado para la evaluación de la exposición a largo plazo para grandes poblaciones en áreas urbanas. Es un método eficaz cuando el objetivo principal es estimar los perfiles de exposición de un área determinada, y es mejor para abordar las variaciones espaciales de los niveles de contaminación del aire en un área determinada que la supervisión del sitio fijo.

3.4. Emisiones por tipo de combustible

Los vehículos ligeros con motor de gasolina son la fuente principal de las emisiones de NO_x, CO y COV en la mayoría de las grandes zonas urbanas. Estos tres contaminantes son precursores del smog fotoquímico que aparece con mayor frecuencia e intensidad en muchas regiones y afecta a gran parte de la población.

Los factores de emisión de NO_x, CO y COV dependen en gran medida de la temperatura media diaria y de los patrones de conducción de vehículos (velocidad promedio, porcentaje de arranques del motor en frío y longitud media de cada viaje). Durante los meses pico de ozono dichos parámetros pueden desviarse considerablemente de sus promedios anuales (la temperatura es más alta y los patrones de conducción a menudo se ven afectados por las vacaciones y el turismo) (Alexander, 2002).

Es importante mencionar que el potencial de generación de emisiones de GEI difiere con base en el combustible que utiliza el vehículo, para el caso de los vehículos que utilizan gasolina, en promedio emiten 266 gramos de CO₂ por Kilómetro recorrido y los vehículos a diésel emiten 833 gramos por Kilómetro recorrido, o sea que un vehículo a diésel emite 3 veces más CO₂ que un vehículo a gasolina por cada Kilómetro recorrido. (ProAire, 2011).

Sin dejar de mencionar que las principales emisiones de GEI que provoca la totalidad de vehículos se consideran el N₂O (óxido de nitrógeno), el CH₄ (metano) y CO₂ (dióxido de carbono). El cual se expresa también en CO₂ equivalente de las principales emisiones del transporte (CO₂, N₂O, CH₄).

En 2006 las emisiones totales de GEI en unidades de CO₂ del sector fueron de 144,69 gigagramos (Gg), como se observa en la Figura 8. La contribución por modalidad fue: automotor 93.3% (134,969.3 Gg); aéreo 3.8% (5,441.3Gg); marítimo 1.6% (2,445.7 Gg) y ferroviario 1.3% (1,834.5 Gg) (INE-Mexicali, 1999).

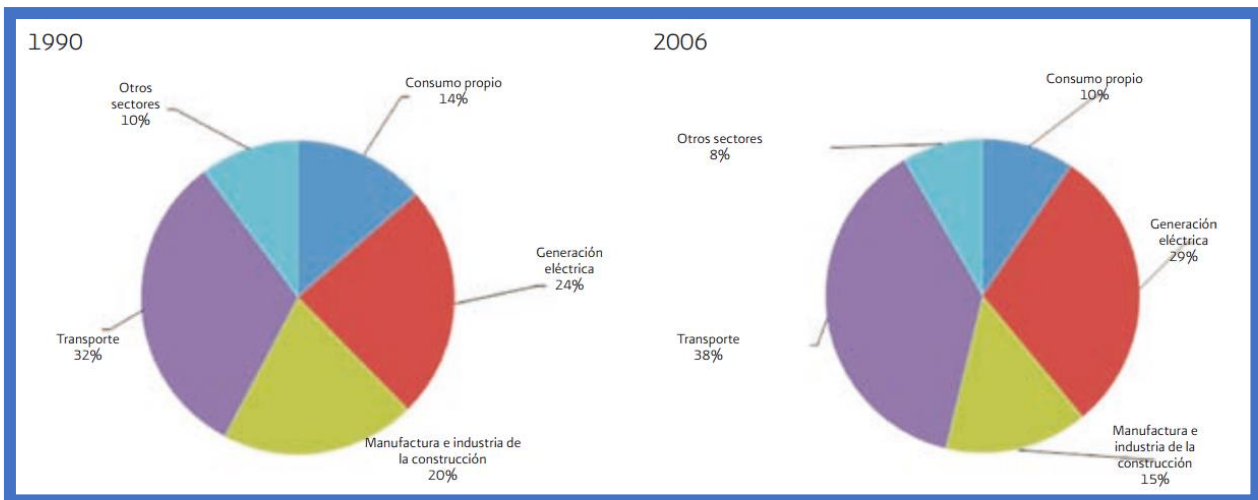


Figura 8. Contribución por sector a las emisiones de GEI de la subcategoría de consumo de combustibles fósiles, 1990 y 2006 (INE-Mexicali, 1999).

Alrededor del mundo se han hecho varios estudios de evaluación en cuanto a la exposición o emisión de diversos contaminantes en el aire, relacionados con el tráfico vehicular como:

En Jamaica, se llevó a cabo una campaña de medición para examinar el nivel ambiental de TSP en la ciudad. Aunque el nivel promedio estaba dentro del

estándar de la OMS de $60 \mu\text{g} / \text{m}^3$, algunos sitios con alta densidad de tráfico tenían niveles de TSP que excedían este estándar. Una investigación en Dar es Salaam, Tanzania también midió los niveles ambientales del total de partículas suspendidas (TSP) en la ciudad. Los niveles de TSP fueron de 40 y $20 \mu\text{g} / \text{m}^3$ en áreas urbanas y suburbanas, respectivamente. Estos bajos niveles de contaminantes pueden deberse a la baja densidad del tráfico en la ciudad.

Un estudio en Mumbai, India encontró que la exposición integrada de 48 horas a material particulado respiratorio (PM₅) entre 24 trabajadores al aire libre (agentes de tránsito y trabajadores al aire libre) durante los meses de invierno era de $322 \mu\text{g} / \text{m}^3$. Esto fue 2.25 veces el indicado por los datos de monitoreo de la calidad del aire ambiente. Esto demostró que la monitorización del aire ambiente a través de unos pocos sitios fijos no puede proporcionar datos precisos de exposición de la población, especialmente aquellas subpoblaciones que están muy expuestas. Esta conclusión fue confirmada por una investigación intensiva de Hong Kong en la cual concentraciones de PM₁₀ cerca de calles concurridas oscilaban entre 25.56 y $337.4 \mu\text{g} / \text{m}^3$ y estos niveles eran significativamente más altos que los datos de estaciones cercanas.

Un estudio piloto de exposición realizado en tres ciudades de Guatemala en mayo y junio de 1997 obtuvo niveles de PM_{2.5} y CO en calles concurridas en estas áreas urbanas durante las horas de trabajo durante el día. Los niveles de PM_{2.5} medidos en diferentes zonas fueron drásticamente diferentes entre sí, con las dos zonas con los niveles más altos integrados de PM_{2.5} de 90 y $100 \mu\text{g} / \text{m}^3$ en Ciudad de Guatemala y Quetzaltenango, respectivamente, mientras que las otras zonas tenían niveles bajos oscilando entre 5 y $60 \mu\text{g} / \text{m}^3$. En un estudio de exposición a contaminantes atmosféricos llevado a cabo en Bangkok, Tailandia, el promedio ponderado en el tiempo de 24 horas (TWA) en el aire ambiental a lo largo de calles concurridas fue de $84,33 \mu\text{g} / \text{m}^3$.

En mayo de 2002, un estudio de exposición en la Ciudad de México dio exposiciones de PM_{2.5} para tres modos de transporte durante las horas pico de la mañana y la noche, los medios aritméticos (medios geométricos) de los cuales fueron 68 (62), 71 (65), 61 (57) $\mu\text{g} / \text{m}^3$ para minibuses, autobuses y metro, respectivamente (Han et al, 2006).

Considerando las variables evaluadas en los estudios antes mencionados, es importante resaltar el estudio de la generación de emisiones de GEI. En particular, al sector transporte se le ha dado mucha atención en los últimos años debido a los esfuerzos por encontrar soluciones a un problema que atañe a todo el mundo, con la finalidad de reducir los GEI, a partir de las variables y factores de mayor impacto, como son la determinación de los niveles de emisión, evaluación del rendimiento en los vehículos, el consumo de combustible, entre otros; los cuales sirvan de base para generar estrategias de mitigación de emisiones en diferentes escenarios (Heidari et al, 2022).

Y como muchas de las investigaciones realizadas ya lo comentan, un punto importante en el monitoreo de emisiones, así como en su emisión, es la toma de datos no solo en puntos fijos, si no puntos dinámicos para poder obtener más veracidad en los resultados.

4. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del modelo de emisiones de gases efecto invernadero, se trabajó sobre la vialidad seleccionada, como se puede observar en la Figura 9; y la metodología a seguir fue la siguiente:

- Recopilación de información socioeconómica, vial, de volúmenes de tránsito, así como lo relacionado con los planes, programas y leyes aplicables.
- Determinación (o selección) de las vialidades a considerar para proponer el flujo vehicular continuo e identificación de los nodos o intersecciones.
- Caracterizar variables y parámetros viales en el área de estudio para analizarlos y procesarlos en el modelo dinámico para estimar la cantidad de emisiones de CO₂ equivalente.
- Realizar una estructuración del modelo ambiental, el cual pueda hacer los cálculos por tipo de transporte, moviendo las variables según las características de modo de transporte a medir.
- Obtener los factores de emisión para cada tipo de transporte, con base en su rendimiento y al método de la guía del IPCC.

- Adaptar, validar e implementar mediante simulaciones un modelo para evaluar a presente y a largo plazo los efectos de los gases efecto invernadero en la calidad del aire, sin aplicar una adecuación vial.
- Proponer planes de adecuación vial y actividades de mitigación relativas al mejoramiento y disminución de emisiones.
- Operar el modelo para evaluar a largo plazo los efectos de los gases efecto invernadero en la calidad del aire, debidos a una adecuación vial principal que propicie el flujo vehicular continuo.
- Evaluación de estrategias y acciones para la planeación eficiente en la gestión de la movilidad vial de la ciudad considerando el factor de impacto de las emisiones.
- Realización de una evaluación de factibilidad: técnica y ambiental.
- Dentro de las evaluaciones, realizar la validación del modelo de simulación por medio de un software, mediante el uso de base de datos de inventarios propios, es una herramienta que permite almacenar, analizar y realizar seguimiento de rendimiento ambiental, permitiendo la representación de graficas de un modo sistemático y transparente. Con esta validación obtener un nivel 3 de evaluación del modelo en cuanto a fiabilidad y calidad de la información obtenida. Cabe mencionar que se realizaron pruebas de simulación y modelación de igual manera, pero adecuado en el software Stella 9.0.3 como parte de la validación de datos y del modelo mismo.

Esta investigación se basa en la jerarquización de las metodologías del IPCC, a manera de generar un buen inventario de emisiones y estimar eficazmente las emisiones de GEI del transporte en un corredor vial principal en Mexicali. Esta división consta de tres niveles o Tiers, donde:

Nivel 1 (Tier 1): Utiliza los factores de emisión por defecto del IPCC, así como datos de actividad más básicos, y menos desagregados, este nivel es el menos detallado.

Nivel 2 (Tier 2): En este son más detallados los métodos y los factores de emisión fuente-específicos, tecnología-específicos, región-específicos y/o país-específicos; se basan en mediciones, y requieren datos de actividad más altamente desagregados.

Nivel 3 (Tier 3): En este es una evaluación rigurosa y específica de la fuente de emisión, tipo bottom-up, que requiere de inventarios detallados de la infraestructura y de factores de emisión específicos o determinación de emisiones en la fuente; es aquí donde entra la aplicación de las tecnologías con ayuda de un software como parte de una evaluación de los inventarios de datos, (Del Ángel, 2013).

Para este caso de estudio se establecen los siguientes criterios y condiciones que forman parte del alcance del nivel 3 (Tier 3) (IPCC, 2014). Para llegar a este nivel se requieren datos de actividad más altamente específicos, por ejemplo, factores de emisión, tecnología de combustión y región de aplicación. Además, se consideraron los kilómetros recorridos y la eficiencia de los vehículos.

Resaltando que se trabajó en jerarquización con los tres niveles para una mayor efectividad del modelo y de los datos que este maneja de manera interna con los algoritmos propuestos, y así poder dar soluciones factibles y viables al problema del movimiento vial y las emisiones de GEI.

Para la selección de la vialidad, se identificaron tres grandes vialidades primarias con las siguientes características: Bulevar Adolfo López Mateos con una demanda vehicular de 48,661 diario promedio anual, el cual se identifica como un eje que rodea la ciudad de noroeste a sureste. Calzada Manuel Gómez Morín (antes Periférico Oriente) con 28,598 y comunica a grandes zonas habitacionales, industriales y comerciales de la parte este de la ciudad, y Bulevar Lázaro Cárdenas con 68,013 vehículos y es otro de los ejes importantes que atraviesan la ciudad, en el sentido este-oeste, donde existe el mayor flujo vehicular, entre estas vialidades (UABC, 2001) (PMVT, 2011).

Considerando lo anterior, la selección de la vialidad en este estudio se realizó tomando en cuenta los siguientes criterios:

1. Ser una vialidad primaria.
2. Tener un alto volumen vehicular en relación a otras vialidades.
3. Presentar variedad en la clasificación vehicular en circulación.
4. Conectividad con otras vialidades primarias y secundarias, así como con una diversidad de usos de suelo urbanos.

Lázaro Cárdenas) considerando como área de estudio un tramo con una extensión de 11.4 Km.

Algunos de los datos que se obtendrán sobre los Gases efecto invernadero (CO₂, N₂O, CH₄), serán por medio del CO₂ equivalente. De igual manera para el análisis de la información se trabaja con una muestra para obtención de datos de vialidades, e incluso para la obtención de algunos factores específicos, mientras que los datos generales se obtendrán por medios indirectos. Los insumos que se obtienen servirán de base para un horizonte de planeación en generación y modelación de escenarios a largo plazo (a 20 años).

El estudio está enfocado en la cantidad de vehículos motorizados que transitan en Boulevard Lázaro Cárdenas de la ciudad de Mexicali, tomando como tramo de la Calle H. Colegio Militar a calle Novena (en ambas direcciones). En un primer periodo del 01 de julio del 2017 al 30 de junio del 2018 y posteriormente un periodo de actualización del 01 de febrero del 2018 al 31 de enero del 2019. La vialidad de estudio se dividió en 11 puntos estratégicos para la recolección de información, con base a la movilidad de la población, como se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Ubicación de puntos de aforo en Blvd. Lázaro Cárdenas

Punto de aforo	Ubicación del punto de aforo
1	Entre H. Colegio Militar (calle 11) y Calle Montecarlo
2	Entre Unión Baikal y Lago Chad
3	Entre Lago Poopó y Unión Managua
4	Entre Calle Niños Héroes y Blvd. 1810
5	Entre Calle Carmen y Calzada Fco. L. Montejano
6	Entre Calle 4 Ciénegas y Calle Parras
7	Entre Río San Lorenzo y Río Culiacán
8	Entre Río Presidio y Río Acaponeta
9	Entre Manuel Gómez Morín y Venustiano Carranza
10	Entre Calle Laguna de Zempoala y Calle Primera

La recolección de insumos informáticos y técnicos, se hizo en primer lugar con la toma de aforos por medio de un contador manual análogo de 4 dígitos, durante los periodos antes mencionados, con la finalidad de cubrir 12 meses de información actualizada. Posteriormente se tomaron las mediciones cada 15 minutos, hasta completar un periodo de una hora en cada sentido de circulación (Este-Oeste y Oeste-Este) en tres periodos del día, matutino, vespertino y nocturno, durante el mismo día cada mes con el fin de obtener mediciones representativas en días hábiles durante un año. Los horarios en los tres periodos elegidos fueron: 08:00-10:00, 12:00-14:00 y 17:00-19:00. Teniendo así un promedio de 20,075,377 vehículos por año en dirección Este-Oeste de la vialidad y un promedio de 18,793,765 vehículos por años en dirección Oeste-Este, obteniendo un promedio general en ambas direcciones de 38,869,143 vehículos transitando por año. Cabe mencionar que en estos horarios se presenta la mayor demanda de movimientos vehiculares. Los datos obtenidos servirán como datos de entrada para establecer el escenario actual y las proyecciones.

La vialidad de estudio consta de un tramo de 11.4 km a lo largo de los 11 puntos asignados estratégicamente; se obtuvieron los siguientes datos aproximados, como la distancia recorrida por todos los vehículos y fue de 464,536,892 Km/año, con un rendimiento ponderado en el área de estudio para el 2019 de 7.532 Km/l., el cual se pretende que vaya en aumento debido tanto a la producción de vehículos cada vez más eficientes como a la demanda cada vez mayor de vehículos pequeños; se calculó el combustible consumido de 61.669×10^6 l/año, contemplando un factor de emisiones el cual está en función de la edad promedio de los vehículos y de las condiciones mecánicas que se refiere al factor de incremento del rendimiento (conservando la potencia del motor) por mejora de la tecnología, y así poder obtener las emisiones de CO₂ equivalente de 147,971 ton/año.

Es importante mencionar que los factores de emisiones son aproximados según el proyecto para desarrollar el programa de cambio climático en el Estado de Baja California, ya que obtuvieron de las proyecciones que se hicieron del 2012

por año hacia el 2042, de donde se manejó el factor para el 2018, resaltando que una vez teniendo completo el ciclo de los datos medidos se pretenden actualizar dichos factores para posteriormente poderlos trabajar en el modelo propuesto.

Por otra parte se obtuvieron datos adicionales para el estudio como: Velocidades promedio, datos de Ruido en decibeles, tipos de placas de los vehículos, ver figuras 10, 11 y 12; así como el tipo de conductor en género y edad, cantidad de ocupantes por vehículo, uso del cinturón de seguridad, edad de los vehículos y tamaño del motor, de los cuales se tomaron los datos en tres tipos de vialidad, primaria, secundaria y terciaria, para así poder obtener un promedio equilibrado y eficiente de los datos, esto con el fin de poder generar alternativas o escenarios de mejora ambiental.

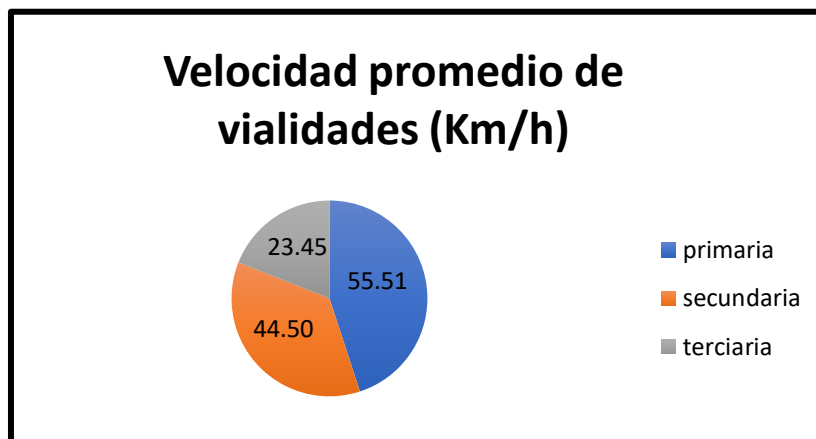


Figura 10. Velocidades promedio de vialidades en Mexicali.

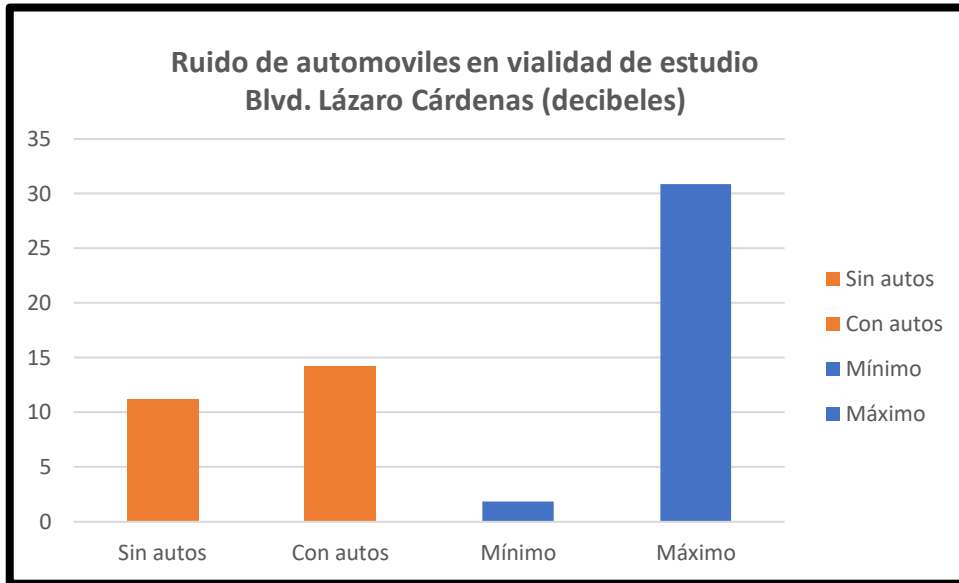


Figura 11. Ruido provocado por vehículos en vialidad de estudio (Blvd. Lázaro Cárdenas) de Mexicali.

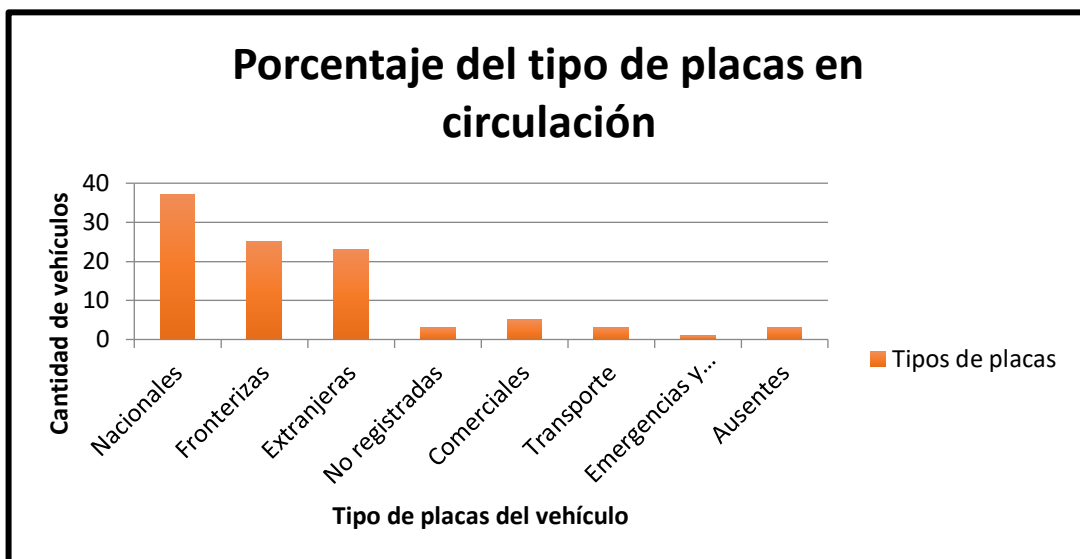


Figura 12. Porcentajes por tipo de placas en circulación en Mexicali.

4.2. Estructuración del modelo ambiental

Como parte del análisis de la información y, para cuestiones de agilizar el procesamiento de los datos, se hizo una estructuración del modelo base, para obtener información por tipo de transporte (autos, motos, autobuses y camiones de carga los cuales a su vez se clasifican en carga ligera y carga pesada). Esto con el objetivo de facilitar la cuantificación y estimación de las emisiones de CO₂ equivalente. En la Figura 13 podemos observar la estructura del modelo de

manera resumida la cual será utilizada como ya se mencionó para el cálculo por tipo específico de transporte.

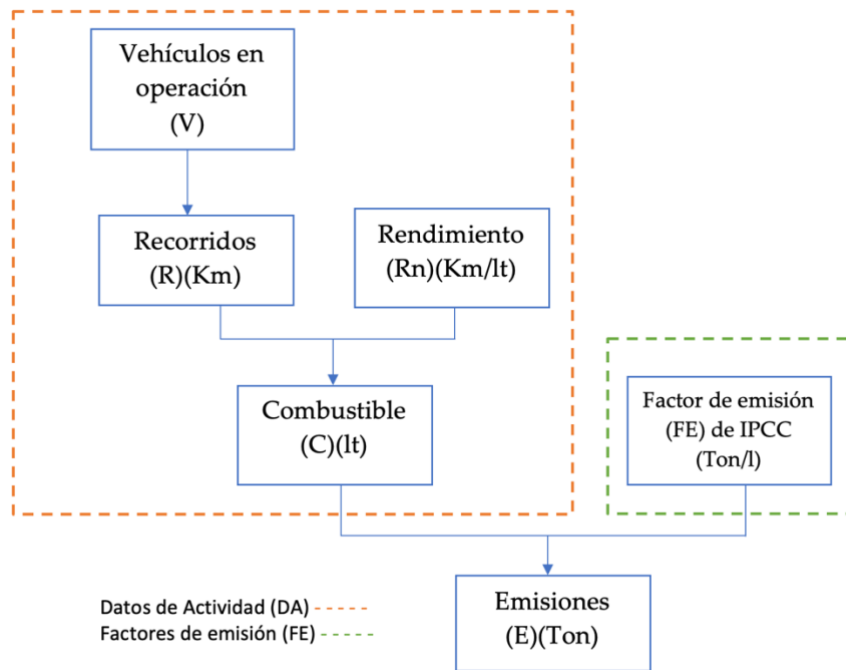


Figura 13. Estructura sintetizada del modelo de estimación de emisiones (elaboración propia) basado en IPCC.

Con base en la estructuración de modelo se siguieron haciendo la toma de datos de campo para actualizar los datos por temporadas muy específicas y estratégicas para fiabilidad de los datos tomados, se actualizo la toma de aforos de la primera temporada de julio 2018 hasta la actualización en el año base 2019, así mismo se sacaron las distribuciones de manera mensual y de manera semanal. Como se observa en las figuras 14, 15 y 16.

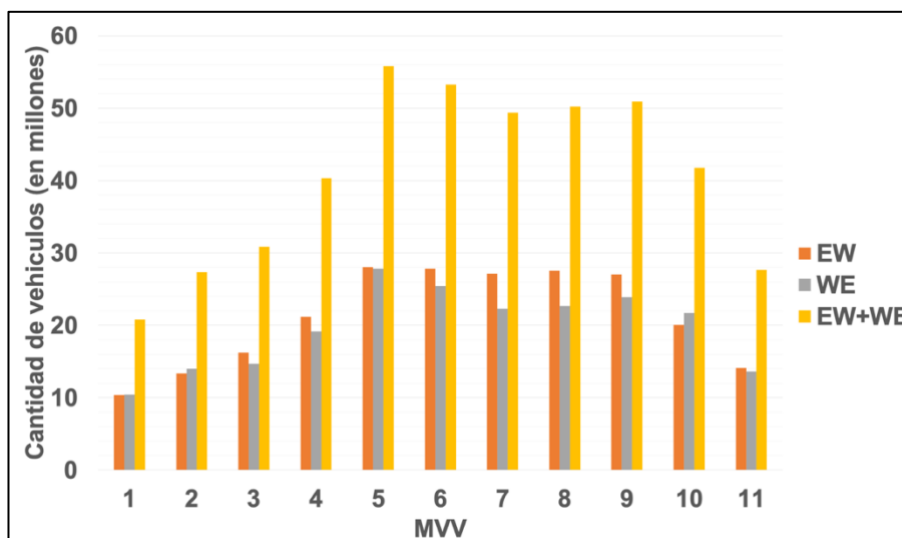


Figura 14. Vehículos en circulación en un año en la vialidad de estudio.

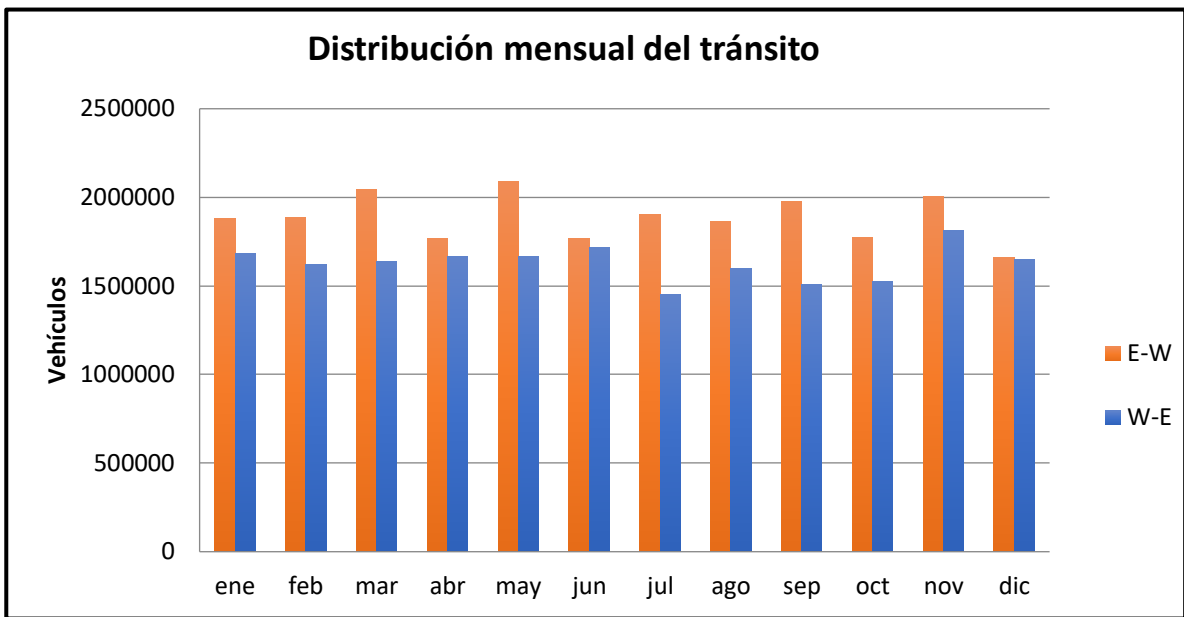


Figura 15. Distribución mensual del tráfico.

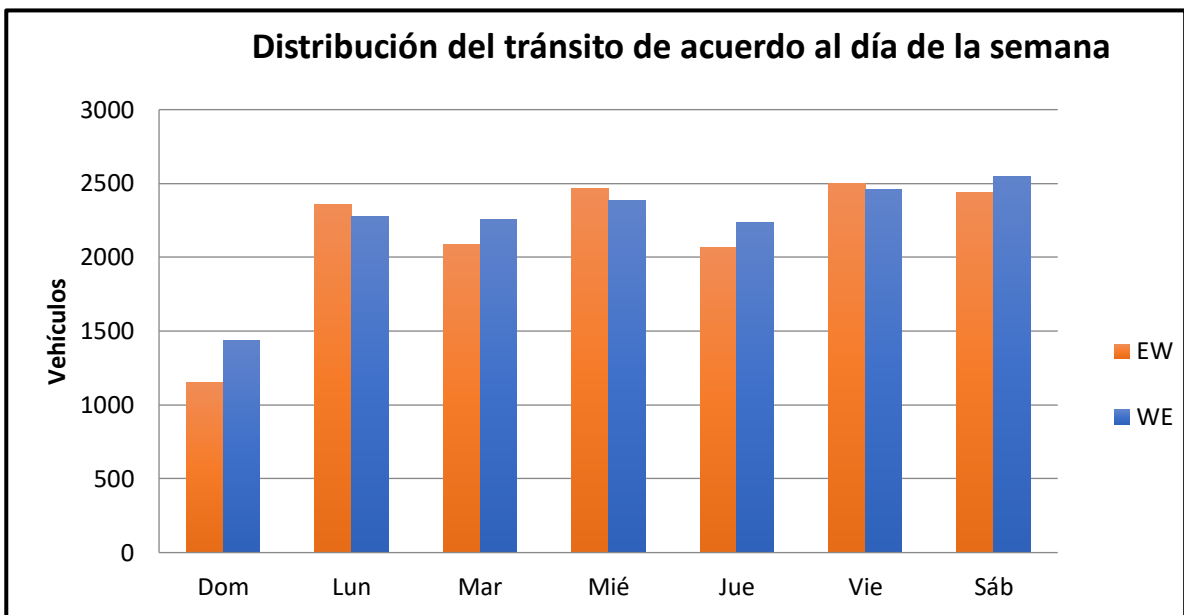


Figura 16. Distribución del tránsito de acuerdo al día de la semana

4.3. Obtención de factores de emisión

Como parte de la obtención y análisis de los datos y la información se obtuvo una cantidad estimada de emisiones de CO₂ equivalente por parte del sector transporte generadas en el tramo de vialidad de estudio en cuestión (Blvd. Lázaro Cárdenas), esto como parte de una primera visualización de la situación

actual, es importante mencionar que para la obtención de estas emisiones se trabajó con un factor de emisiones estimado para el año en cuestión por parte del proyecto para desarrollar el programa de cambio climático en el Estado de Baja California con las proyecciones propuestas.

Mas sin embargo con la estructuración del modelo con base en la división por tipo de transporte, se trabajó en obtener los factores de emisión para autos, motos, autobuses y camiones de carga (ligera y pesada), para lo cual en primera estancia se hizo el cálculo de los rendimientos para cada tipo de transporte por medio de la medición de los datos obtenidos, así como de ponderaciones con cálculo para tener un rendimiento lo más real posible. Posterior a tener los rendimientos se acudió al método de cálculo de factores de emisión de la guía del IPCC (panel intergubernamental de cambio climático) quien estima estos factores a partir de: velocidades promedio, temperatura ambiente, rango de temperatura diurna, altitud y volatilidad del combustible que se proporcionan al modelo. También se ven afectados por la supuesta presencia o ausencia de programas de inspección/mantenimiento (I/M) y programas anti manipulación, así como también por el tipo de programa I/M utilizado. El modelo calcula los factores de emisión utilizando tres condiciones estacionales: primavera/otoño, invierno y verano (Tabla 5).

Partiendo de estas condiciones, se muestra más adelante la proyección a 20 años de las emisiones considerando datos históricos vehiculares de la zona de estudio para el periodo 1980 al 2019, obteniendo su promedio ponderado por tipo de vehículo para los cálculos de estas emisiones.

Tabla 5. Rendimientos y factores de emisión por tipo de transporte.

TIPO DE TRANSPORTE	Rendimiento (Km/l)	Factor estimado de emisión (CO ₂ eq.)
AUTOS	6.146	0.383 kg/Km
AUTOBUSES	4.77	0.396 kg/Km
Carga ligera	7	0.396 kg/Km
Carga pesada	3.62	1.017 kg/Km
MOTO	60	0.11777 kg/Km

Una vez teniendo los factores de emisión para cada tipo de transporte y en nivel 1 de la guía del IPCC; es posible hacer el cálculo de las emisiones por tipo de transporte en este corredor vial principal, el cual es un dato muy relevante para el estudio ya que no existía antecedente de la medición en esta vialidad, y de esta forma poder tomar decisiones con base en la estructuración y simulación del modelo, así como analizar el panorama actual que se está trabajando. A continuación, podemos observar el algoritmo nivel 1 con el que se trabajó, así como el grafico de las emisiones en la Figura 17.

Por tipo de fuente: móvil

Por sector: transporte

$$\text{Fórmula: } E = C \times F$$

Simbología:

E = emisiones

C = consumo de combustible

F = factor de emisión de contaminantes

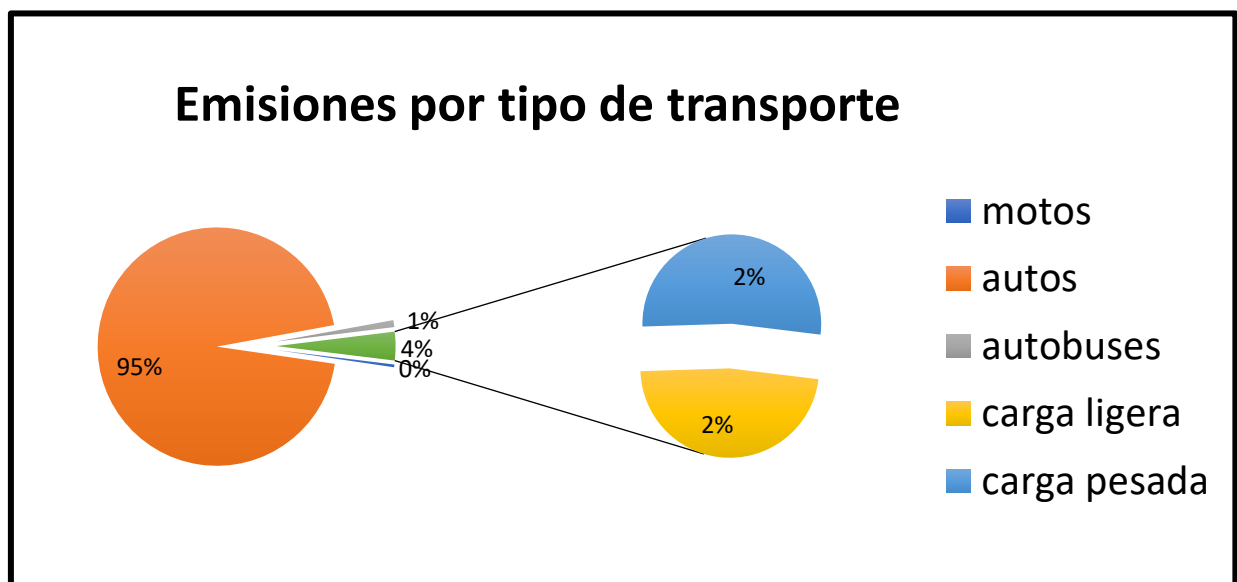


Figura 17. Emisiones de CO₂ equivalente por tipo de transporte.

5. RESULTADOS

5.1. Simulación de datos

Como parte de la etapa de simulación de datos para correr el modelo y obtener resultados de comparación para generar análisis de los mismos se procede a trabajar en un nivel 2 con base en la guía de metodologías que maneja el IPCC, en el cual ya se trabaja simulando los datos obtenidos y correrlos con sus respectivos algoritmos en el paquete de cómputo denominado Excel así como su modelación y simulación en el programa Stella 9.0.3; el cual es un programa que permite realizar la modelación dinámica y presentar los procesos de estimación y resultados de una manera gráfica. Mediante la aplicación de este software, se realizó el diseño del modelo, a través del cual se estimaron las emisiones generadas por cada tipo de vehículo. La estructura básica de este programa de cómputo utiliza una interface gráfica (íconos) que representa los diferentes tipos de variables-procesos y su interrelación, por medio de stocks, (stock) de datos, conectores por medio de flechas que se encargan de indicar la interrelación entre variables y enlazar los objetos de estudio, convertidores en los que se desarrollan los algoritmos y se expresan los datos de las variables independientes, y flujos de conexión para representar los índices o tasas de cambio de variables, tanto positivas como negativas. Esto como parte de la validación de los mismos y para una mejor visualización de los datos obtenidos en las corridas de simulación.

En este proceso es posible utilizar funciones preconstruidas dentro del programa Stella, o bien, expresar los algoritmos que representan las variables y/o sus interrelaciones para entrada o salida hacia las variables y poder ejecutar el modelo, e incluso verificar el lenguaje del modelo con los algoritmos y comprobar que se cumplan con las características completas, y hacer una conexión en cálculo de las emisiones totales como se puede observar en la Figura 18.

La dinámica del modelo está estructurada con base en el orden que llevan las variables con sus respectivos algoritmos, de manera que primero se mide el comportamiento de los vehículos teniendo aquí una tasa de vehículos ponderada que está en función de la segmentación por punto del área de estudio (según su longitud) en contraste con la cantidad de vehículos circulando sobre cada

sección, para obtener los recorridos en Blvd. Lázaro Cárdenas, posteriormente se obtiene la medición del rendimiento el cual trabaja con una tasa de rendimiento calculado con datos históricos y el rendimiento actual para la obtención del combustible consumido y finalmente en conjunto con el factor de emisiones generar la cantidad de emisiones.

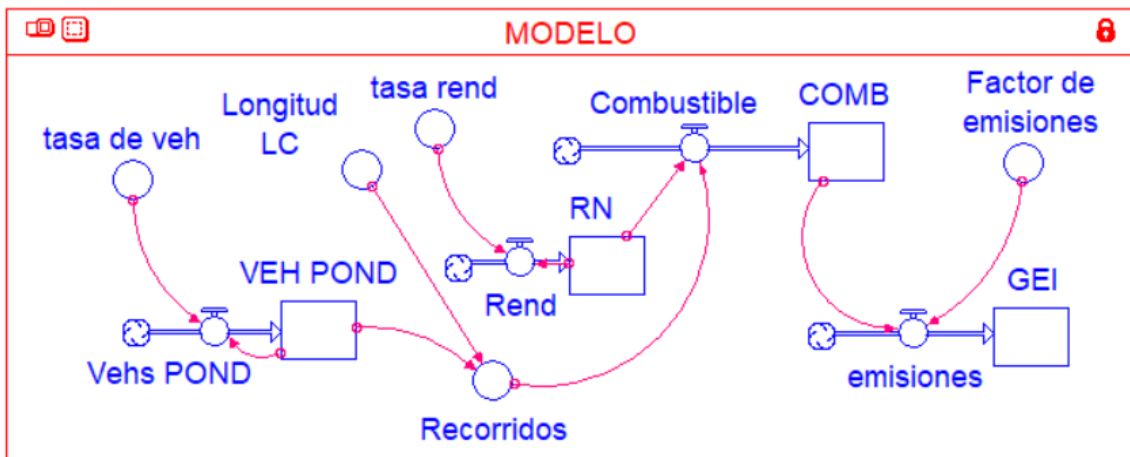


Figura 3. Modelo de emisiones en Stella 9.0.3. (Con representación rectangular para “stocks”, circular para los “convertidores” y de válvula para los “flujos”).

Para la simulación del modelo se trabajó con una base de 40 años históricos (1980 a 2019) de datos vehiculares y con sus rendimientos, tomando como referencia inicial la variable directa de rendimiento (Rn) publicado en el documento oficial (PEACC, 2013). Con base en los datos históricos de esta última variable se obtuvo el rendimiento ponderado de vehículos circulando en la zona urbana de Mexicali para el año 2019, el cual fue de 1.1%. A partir de lo anterior se obtuvo el rendimiento ponderado y el factor de incremento de rendimiento por condiciones de operatividad en el Blvd. Lázaro Cárdenas para dicho año, considerando los datos de la vialidad que permitieron trabajar a menor escala.

Estos datos y resultados mediante simulación en Excel están calculados para el área de estudio, siendo esta el corredor vial principal de la ciudad de Mexicali para el año 2019; obteniendo que los vehículos en un año (periodo del 01 de febrero del 2018 al 31 de enero del 2019) fue de 39,654,389 vehículos, con un incremento de 2018 a 2019 (en base a la referencia del PEACC 2013) de 1.0276. Y los vehículos en un año (con periodo del 01 de febrero del 2019 a 31 de enero

del 2020) como proyección es de: 40,748,850 vehículos; esto solo en el área de estudio.

Como distancia recorrida por todos los vehículos es de: 464,536,892 Km/año; así con este dato se puede obtener el rendimiento de los vehículos en promedio dependiendo de la edad y condiciones mecánicas, así con su debido desplazamiento, teniendo un rendimiento finalmente de: 7.532 Km/lit. Y llegar al cálculo del combustible consumido como dato esencial para el cálculo de las emisiones, el cual fue de: 65,335,709 lit/año.

Con el cálculo que se realizó en un nivel 1 para estimar las emisiones de CO₂ equivalente y los diferentes factores de emisión, en primera estancia se obtuvo un factor general de emisiones para el 2019 con referencia en el PEACC 2013, de: 0.00229530 ton/lit. De donde se obtuvo que las emisiones de CO₂ equivalente generadas por todos los vehículos fueron de: 147,971 ton/año.

Posteriormente a esto, se hizo la simulación para el modelo ambiental de transporte, con la diferencia de que se trazó la partición por tipo de transporte para una mayor visualización y efectividad en los datos resultantes, como se puede observar en la Tabla 6.

Tabla 6. Factores de emisión y rendimiento calculados por tipo de transporte (datos de referencia).

			Rendimiento	Factor de emisiones	Rendimiento	Factor de emisiones	referencia:			
TIPO	%		Km/lit	Ton/lit	Km/lit	Ton/lit	Kg/Km	Ton/Km	Km/lit	Ton/lit
Autos	94	0.9400	7.110	0.0022953	0.13220816	0.00215758	0.383	0.000383	6.146	0.002353918
Autobuses	0.91	0.0091	3.339	0.0033154	0.00272537	0.00003017	0.396	0.000396	4.77	0.00188892
Camiones	3.91	0.0391	3.620	0.0033154	0.01080110	0.00012963	1.017	0.001017	3.26	0.00331542
Motocicletas	1.18	0.0118	40.000	0.0070662	0.00029500	0.00008338	0.11777	0.00011777	60	0.0070662
					6.847925344	0.002400765				

En la simulación con los datos por tipo de transporte se manejaron los siguientes valores:

- Distancia recorrida por todos los vehículos: 464,536,892 Km/año
- Rendimiento: 7.532718 Km/lit
- Combustible consumido: 61,669,227 lt/año
- Factor de emisiones: 0.00239943 ton/lit
- Emisiones de CO₂ equivalente para 2019: 147,971 ton/año

En la Tabla 7 se puede observar el desglose de los datos por tipo de transporte.

Emisiones 2019 por tipo de vehículo			Recorridos	Rendimiento	Rendimiento	Combustible	Factor de emisión	Emisiones
			Lázaro Cárdenas	Mexicali	Lázaro Cárdenas			CO2 eq
Tipo	%	Unidades	Km/año	Km/lit	Km/lit	lt/año	Ton/lit	Ton/año
Autos	94.00	38303919	436664678	7.110	7.821	55832333	0.0022953	128152
Autobuses	0.91	370815	4227286	3.339	3.673	1150940	0.0033154	3816
Camiones	3.91	1593280	18163392	3.620	3.982	4561374	0.0033154	15123
Motocicletas	1.18	480836	5481535	40.000	44.000	124580	0.0070662	880
Totales		40748850	464536892			61669227		147971

Tabla 7. Emisiones por tipo de vehículo mediante simulación.

En las figuras 19 y 20 se puede observar la tendencia de las emisiones de GEI producidas por los tipos de transporte seccionados en autos, autobuses, camiones y motocicletas, en un lapso de 20 años sin adecuación vial.

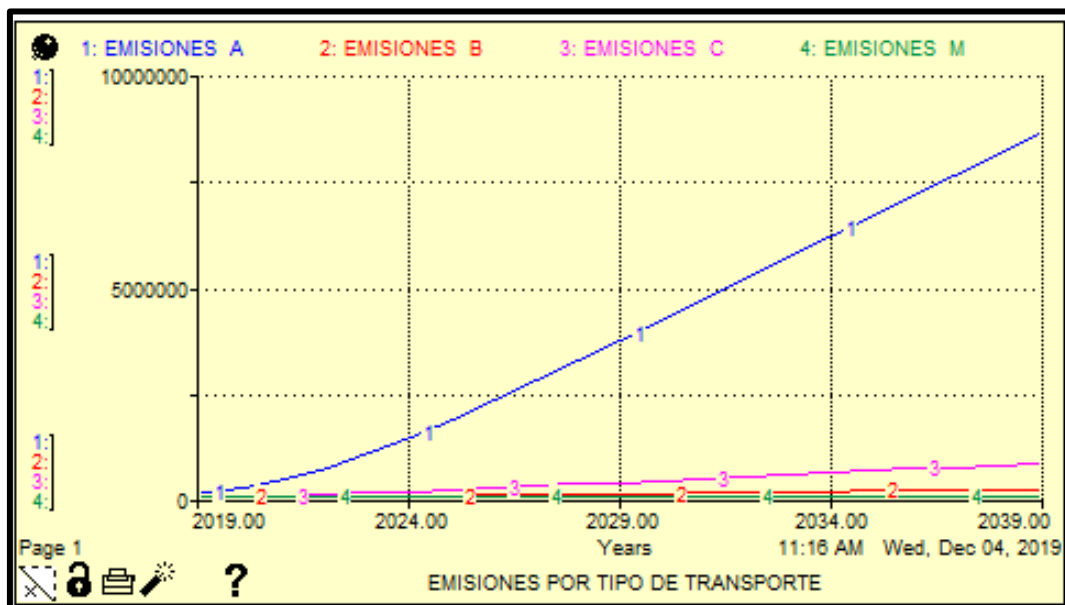


Figura 19. Proyección de emisiones de GEI por tipo de transporte.



Figura 20. Proyección del total de las emisiones de GEI en corredor Lázaro Cárdenas.

5.2. Planeación y simulación de acciones de mejoras viales

En esta etapa de la metodología una vez que se tienen los resultados de la simulación de los datos del año base (2019), y con las corridas de modelación en el programa Stella 9.0.3., mediante la proyección a 20 años para tener la tendencia de las emisiones de CO₂ equivalente por cada tipo de transporte y a su vez en su totalidad dentro del corredor Lázaro Cárdenas, se realiza la simulación y la modelación de los datos con las propuestas de mejora, las cuales estuvieron en función de acciones que consideran el desarrollo urbano de la ciudad, para analizar su efecto en las emisiones de CO₂e. Las acciones de mejora son:

1. Las mejoras de infraestructura vial (incorporación de carriles, semáforos inteligentes).
2. Reencarpetamiento vial.
3. Flujo continuo (sin permitir cruces con otras vialidades).

Como lo comentan (Díaz y Sosa, 2022), dentro de las estrategias de movilidad sostenible un aspecto importante es tener acciones para MEJORAR la tecnología, operaciones y diseño de la infraestructura y los vehículos, logrando entonces efectos positivos.

Estas acciones de mejora se pueden incorporar al software Stella a través de los algoritmos de los recorridos por vehículo (Rv) y el consumo de combustible (C), ya que ambos parámetros impactan directamente en la generación de las emisiones de GEI.

Teniendo los recorridos dentro de la vialidad y a partir del factor de incremento para el rendimiento ponderado obtenido previamente en una serie de tiempo, se realizaron iteraciones con el método de Euler sobre las emisiones vehiculares del periodo base para obtener proyecciones a futuro que sirvan para identificar su tendencia en el tiempo, fijando un horizonte a 20 años (2019-2039), tanto para el escenario tendencial como para el de mejora.

5.3. 5.3. Proyección mediante simulación y modelación de emisiones de CO₂ equivalente.

Con base en la planeación y simulación de las emisiones de CO₂ equivalente, y debido a las adecuaciones hechas recientemente en el área de estudio, las cuales se modifican en variables de prioridad para el algoritmo de la simulación en el modelo, en donde las variables que repercuten de manera considerable en el resultado de las emisiones son el rendimiento de las unidades móviles, debido a los cambios de la velocidad promedio de las mismas en la ruta y por ende en el combustible consumido durante los trayectos promedios. Por tal motivo se realizó un ejercicio de regresión para determinar los rendimientos con respecto a la velocidad para un vehículo específico como se muestra en la gráfica de la Figura 21. Así mismo se puede observar en la gráfica de la Figura 22 el rendimiento para un vehículo típico que circula en el área de estudio (Blvd. Lázaro Cárdenas).

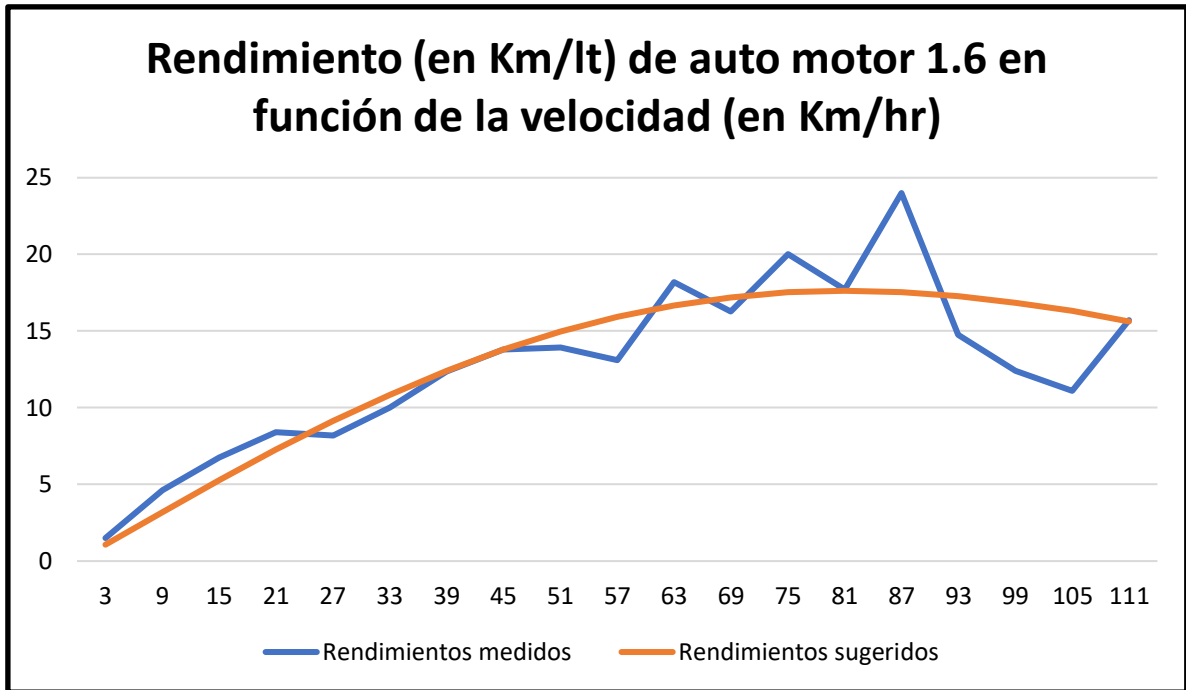


Figura 21. Rendimiento (Km/lt) de auto motor 1.6 en función de la velocidad (Km/hr) [18].

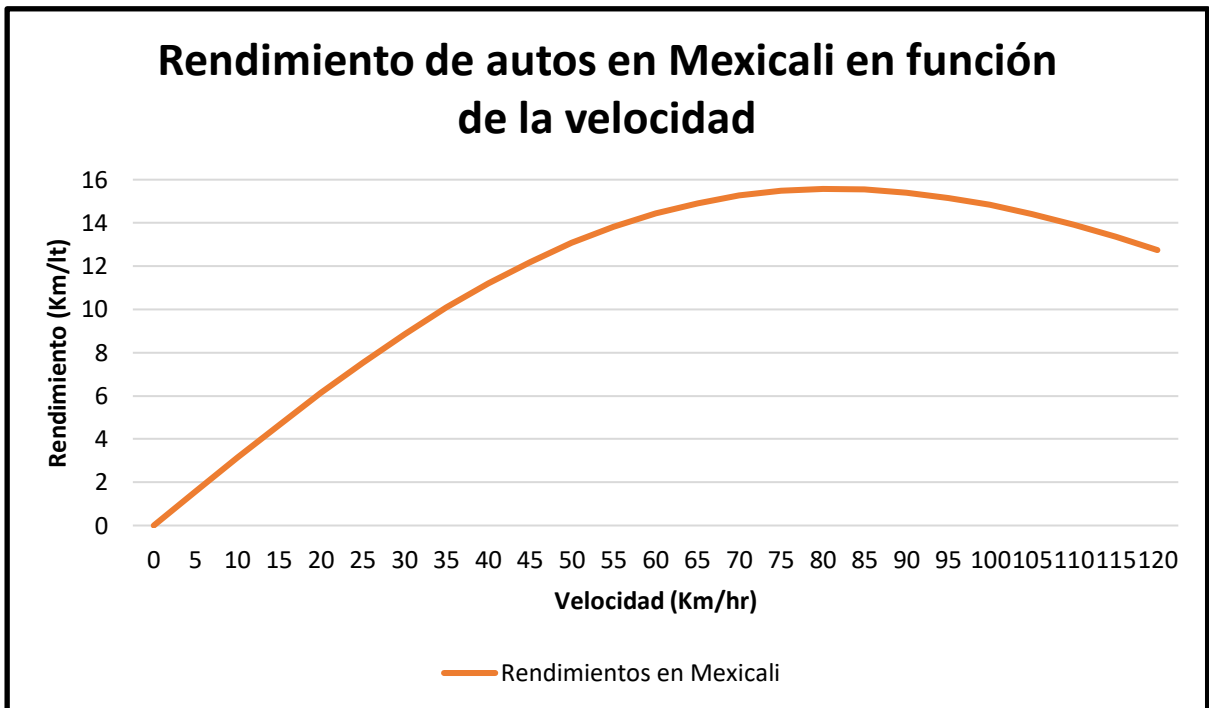


Figura 22. Rendimiento (Km/lt) de autos en Mexicali en función de la velocidad (Km/hr) [18].

Considerando los diferentes tipos de vehículos: autos, motocicletas, autobuses y camiones de carga (ligera y pesada), se obtuvieron las emisiones de CO₂e para cada punto de medición del Blvd. Lázaro Cárdenas, ya que su variabilidad en cada uno impacta directamente en las emisiones (Figura 23). En esta misma figura se observa que el punto 5 presenta los valores máximos de CO₂e, considerando todos los tipos de vehículos da como resultado 202,666 Ton/año, esto se asocia al alto flujo vehicular que representa una cantidad alta de recorridos de 636,244,430 Km/año.

Posteriormente, en el punto 7 disminuyen los recorridos y las emisiones un 12% con respecto al valor máximo de emisiones, y se incrementan los valores a 572,469,060 km/año en recorridos y 182,351 Ton/año en emisiones de CO₂e en el punto 8 debido a los volúmenes registrados, aunque no sobrepasa los valores más altos obtenidos en el punto 5. En el punto 10 disminuyen nuevamente las emisiones de CO₂e un 25% con 151,568 Ton/año respecto al máximo, ya que son puntos finales de la vialidad que tienen menor demanda vehicular.

Se puede observar una diferencia evidente en la cantidad de emisiones en cada punto, por parte de los vehículos particulares (Autos) siendo este el principal modo de transporte (Figura 23); con un promedio de: 128,152 y una desviación estándar de 38,509 Ton/año para los autos; 3,816 y 1,147 Ton/año para autobuses; 15,123 y 4,544 Ton/año para camiones; 880 y 265 Ton/año para motocicletas; siendo los autos la más significativa ya que representa el 87% del total de los vehículos estudiados. Lo anterior, debido en gran medida al crecimiento poblacional que se tiene en la ciudad, que cuenta actualmente con 1,049,792 habitantes y tiene una tasa de crecimiento de 1.2% del 2015 al 2019 confirmado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020), así como al incremento del parque vehicular en un 60.2% el cual superó notablemente el crecimiento poblacional. Queda de manifiesto que esta ciudad debe considerar otras alternativas de transporte, como son los sistemas de transporte inteligentes, el uso de vehículos eléctricos, híbridos, la propuesta de

vehículos autónomos, etc. (Chatzokomis et al, 2014) (Turcksin et al, 2013) (Mamalis et al, 2013).

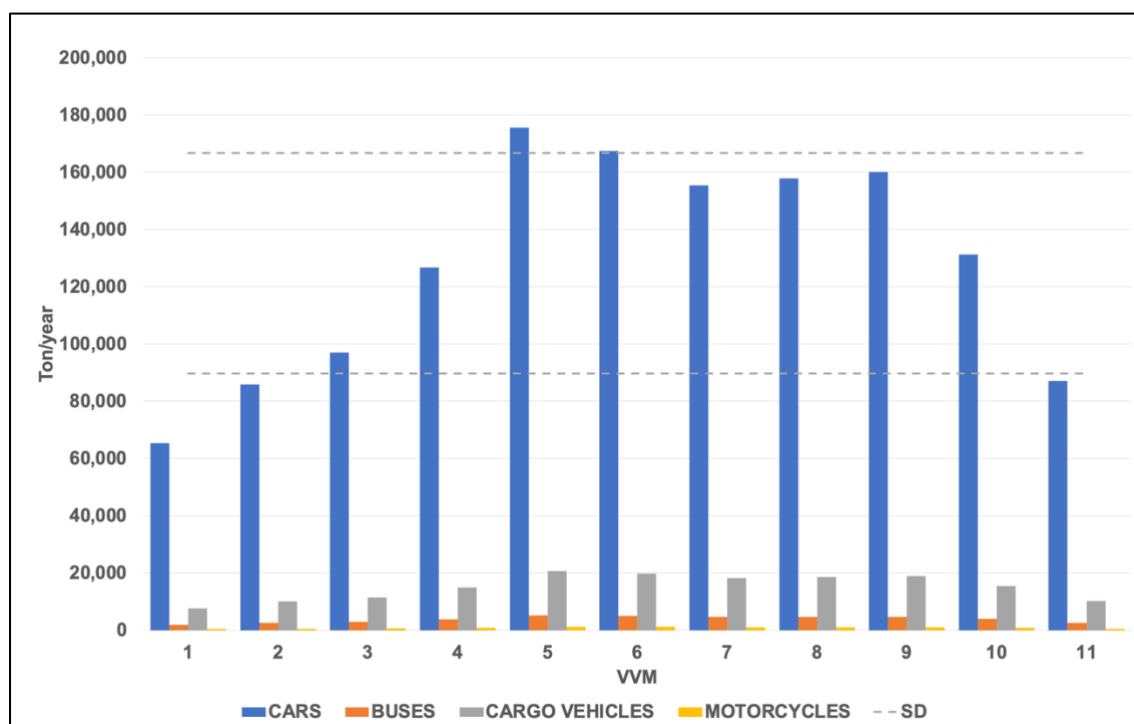


Figura 23. Emisiones de CO₂e por tipo de vehículo en cada Punto.

Se plantearon dos escenarios de proyección en un horizonte a 20 años (2019-2039). El primero de ellos está en función de la información presentada en la Tabla 7, sin aplicar adecuaciones viales o acciones de mitigación, en un supuesto de que en el periodo de 20 años todo continúe de la misma manera, lo que representa el escenario tendencial. En éste se observa que, dentro de la proyección de emisiones de CO₂e al año 2039 se presenta un incremento anual, teniendo un total de 5,037,728 Ton/año al final de la proyección. El comportamiento de estos incrementos se observa en las barras de color rojo de la Figura 24.

Mientras que, en el segundo escenario se aplicaron adecuaciones de mejora vial y/o acciones de mitigación en el Blvd. Lázaro Cárdenas. Se trabajó con el rendimiento (Rn) como variable directa y de impacto para las emisiones de CO₂e, fijando su factor de incremento en 1.1% (PEACC, 2013), con un respaldo histórico en datos de 40 años. Esto conlleva a un aumento en las emisiones de manera ponderada debido tanto a la producción de vehículos cada vez más

eficientes como a la demanda cada vez mayor de vehículos, ya que el rendimiento (R_n) está en función de la edad promedio de los vehículos y de las condiciones mecánicas que repercuten directamente sobre las emisiones. También se consideró la influencia del comportamiento vial de la totalidad de la zona urbana de Mexicali en 2019 de 6.8479253, ya que esto repercute sobre la vialidad de estudio.

Adicionalmente, la construcción de infraestructura vial podría propiciar el flujo continuo de los vehículos al evitar demoras e interrupciones en su recorrido, lo cual mejoraría el desempeño de la variable rendimiento (R_n), ya que está directamente relacionado con el consumo de combustible y por lo tanto con las emisiones generadas, indicando que, a mayor rendimiento, menor generación de emisiones de CO_2e . En la proyección con adecuaciones al 2039, considerando los cambios mencionados, se tiene una disminución en las emisiones de CO_2e hasta del 5% (barras verdes, Figura 24).

Como se observa, la modelación arrojó un comportamiento exponencial en las emisiones, con un crecimiento en el escenario tendencial y decremento diferenciado en el escenario con adecuaciones. Además, a pesar del impacto que generará el crecimiento poblacional y el índice de motorización, que repercuten en el incremento del volumen vehicular y en los valores de CO_2e más elevados, aun así, las emisiones totales proyectadas al 2039 no superaron las obtenidas en el periodo base. Queda así demostrado que, con la aplicación de acciones adicionales de mejora, aplicables directamente al vehículo y a la planeación urbana, se obtendrían mejores resultados para mitigar GEI en este sector.

Finalmente, la variación porcentual entre las emisiones del escenario con adecuaciones respecto al escenario tendencial, muestra que en los primeros 8 años el porcentaje de disminución de las emisiones está por debajo del 1%. A partir del 2027 hay un decremento gradual hasta el año 2039, donde el signo

negativo implica que es una disminución, hasta llegar casi a un 5% al final de la proyección.

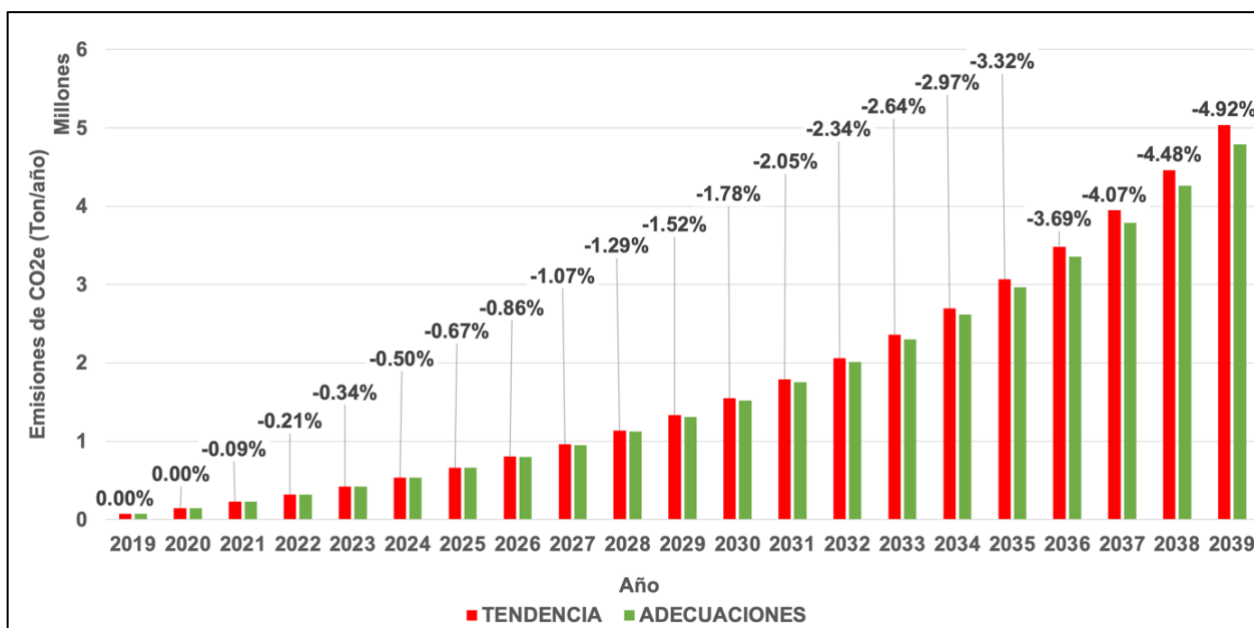


Figura 23. Proyecciones tendenciales y con adecuaciones del Total de Emisiones de CO₂e en la vialidad BLC del 2019 al 2039.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La zona urbana de la ciudad de Mexicali, presenta continuamente periodos con niveles insalubres de calidad del aire; y unas de las herramientas con mayor efectividad para describir el comportamiento de los contaminantes atmosféricos en zonas urbanas, son los modelos matemáticos que describen el desarrollo de los inventarios de emisiones y su comportamiento en plazos de tiempo y lugar. En contraste afirma Mendoza (2009), que con el fin de diseñar estrategias de control que sean efectivas en la reducción de emisiones contaminantes se han diseñado varias herramientas para el análisis de estos casos; y dentro de esta investigación no es la excepción ya que el modelo propuesto es una herramienta disponible para estudiar los inventarios de emisiones en lugar y tiempo y que pueda servir para su futura continuidad el realizar un análisis costo-beneficio de estrategias de mejora y control para las emisiones de GEI del modelo ambiental del autotransporte.

La mayoría de los estudios en aportaciones de inventarios de emisiones a través del transporte concuerdan que es muy importante la evaluación del desempeño de los vehículos para la influencia de sus emisiones en los índices de contaminación atmosférica.

Pese a que los vehículos de modelos recientes cuentan con tecnologías para hacerlos más eficientes en relación a los anteriores, y a que los combustibles han sido mejorados, la emisión de contaminantes a la atmosfera en ciudades mexicanas ha ido en aumento (Menchaca et al, 2013). Y es ahí la contraparte en donde se piensa que las mejores tecnologías en los vehículos nuevos tendrán un mejor rendimiento y brindaran un efecto positivo en las emisiones; más sin embargo si la flota vehicular va en aumento, no permite dar entrada al beneficio antes mencionado.

De acuerdo a los objetivos planteados para dar soluciones efectivas que mejoren la movilidad vial y reducir la emisiones con base en el modelo de emisiones, el cual se trabajó mediante simulación de datos; es importante mencionar que en cuanto a la adaptación, validación e implementación de dicho modelo se pudo demostrar la disminución de las emisiones de GEI en un plano de horizonte de 20 años con una serie de alternativas de mejora para la vialidad de estudio entre las cuales resalta la aplicación de un flujo continuo, trabajando directamente mediante la simulación con las variables directas de la propuesta en cuestión.

Esta investigación busca dar solución a uno de los principales problemas que se presenta en la ciudad: el tráfico que se genera en una vialidad principal (Blvd. Lázaro Cárdenas), asociado a una de las principales fuentes generadoras de emisiones de GEI, y que a su vez genera una serie de consecuencias para el medio ambiente. Esto es, el incremento de traslados que da como resultado en el aumento de externalidades negativas para el medio ambiente, como mayor emisión de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, ruido antropogénico, y el aumento en el consumo de combustible, lo que generará más costos a los automovilistas.

El Blvd. Lázaro Cárdenas de la zona urbana de la ciudad de Mexicali; tiene un desarrollo muy importante de actividades viales durante todo el día, los 7 días de la semana, por lo que presenta una mayor densidad vehicular a comparación de

otras vialidades principales, es aquí donde se presenta un área de oportunidad para minimizar la generación de emisiones que marcan un daño considerable a mediano y largo plazo. Aquí se encuentran las fuentes base de contaminación (vehículos) que afectan la zona urbana; para poder controlar o minimizar las emisiones con el fin de evitar impactos ecológicos severas en un futuro.

Dentro de los resultados del modelo, para ciertas situaciones extraordinarias en el área de estudio, como lo son los trabajos viales que se pudieran presentar en cuanto a mejoras, tales como el reencarpetamiento de la vialidad, adición de carriles, cambios en señalamientos e incluso situaciones como lo fue la pandemia de COVID-19, el cual debido al aislamiento, reduce la movilidad y el tráfico temporalmente en las vialidades; es importante estar actualizando los datos para los algoritmos que maneja el modelo y que los resultados de las emisiones sean más eficientes.

A partir de este estudio, donde se desarrolló una metodología específica, para la realización de un modelo de emisiones, disponible en un escenario base y posteriormente realizándosele propuestas de mejora, que permite su evaluación y análisis previos, supone una herramienta muy útil para los planificadores y proyectistas del sector urbano y vial, en pro de minimizar las emisiones de gases efecto invernadero, poniendo a su disposición, de forma sencilla, una primera estimación de las emisiones generadas por las distintas soluciones y mejoras planteadas, colaborando en la toma de decisiones en cuanto a su reducción, tanto en la fase de valoración, como en la explotación, cubriendo el planteamiento de políticas, etc.

Una vez que se empieza a considerar el modelo de emisiones con respecto al sector transporte en una vialidad primaria de la ciudad, éste puede llegar a convertirse en una importante aportación de desarrollo vial y urbano, como lo es un factor importante en Mexicali en cuanto a demanda de movimientos urbanos, sobre todo si se tiene en cuenta que el transporte tiene una significativa responsabilidad en el total de emisiones de CO₂ y es uno de los sectores que mayores incrementos ha experimentado en los últimos años. Por lo tanto, cualquier actuación sobre estas emisiones tendrá grandes implicaciones para el entorno a corto, medio y largo plazo.

El desempeño y la efectividad del modelo ambiental se evalúa estadísticamente con el objetivo de estimar que tan certeramente reproduce los datos de los casos simulados.

En el análisis de los resultados del modelo y haciendo las respectivas conclusiones se coincide con algunos otros estudios que se han hecho sobre los inventarios de emisiones del sector transporte; donde debido al gran aumento de la flota de vehículos ligeros, el aumento en una de las variables primarias para el modelo que es el rendimiento vehicular, es el esquema de mitigación que mayor disminución en las emisiones promete; sin descartar que con la implementación conjunta con los otros esquemas de mitigación hacen una aportación mas considerable para el modelo. Así mismo es indispensable a la par del modelo tomar acciones en cuestión de la flota vehicular que se tiene actualmente, creando programas a nivel local sobre la reducción de la tasa de crecimiento de vehículos y aumentar el desecho de vehículos obsoletos para llegar a un punto de saturación de menos vehículos por habitantes de la ciudad de Mexicali.

Por otro lado el rendimiento de los automóviles se ve afectado por diversos factores como lo comentan Hilda Torres y Alberto Mendoza en su estudio (Menchaca et al, 2013); ya que entre esos factores; uno es el uso en la ciudad del vehículo, igualmente que el rendimiento se ve afectado por el uso del aire acondicionado, el cual requiere de un mayor consumo de combustible; así como el estilo de manejo del conductor, como otro de los factores que afectan el rendimiento; y muchos otros factores mas como: calidad del pavimento, estructura vial de la localidad, calidad del combustible, mantenimiento del vehículo, etc.

Por lo tanto en este estudio de investigación se trabaja con algunos de estos factores mencionados y que son considerados dentro de la modelación ambiental para la obtención de resultados de mayor eficiencia en consideración a la mitigación de los gases efecto invernadero.

Aunque el presente proyecto ha tenido por objeto el análisis de todos los medios de transporte involucrados en el tránsito por la vialidad de estudio, se ha basado, fundamentalmente, en las emisiones de GEI generadas por cada uno de los tipos

de transporte en los puntos y cruces específicos y seleccionados de manera estratégica para una mejor lectura de datos, donde la información recolectada fue de fuentes primarias ya que actualmente no hay estudios o investigaciones en donde se aborde por completo el tema de las emisiones generadas en vialidades primarias urbanas, y que aunque son mínimas las consecuencias en el presente; a futuro representan un número considerable para la sociedad y que si se trabaja en este pequeño número de emisiones, será una gran aportación a nivel ambiental a sabiendas del panorama que se tiene actualmente en Mexicali, pues sobre las emisiones generadas por los distintos tipos de transporte es sobre los que hay mayor disponibilidad de datos debido a la preocupación de la sociedad por el citado problema del cambio climático. Además, la mayor parte de las medidas que reducen las emisiones de GEI contribuyen a reducir cualquier otro tipo de emisión contaminante, como se ha podido comprobar.

Dentro de los resultados del modelo es importante visualizar que hay áreas de oportunidad de mejora en el comportamiento de las variables y factores, debido al cambio constante en diferentes periodos estacionales en la zona de estudio o en su caso para casos extraordinarios como lo acontecido en el modelo en periodo de pandemia 2020 (covid-19).

Es muy importante mencionar que como parte de los objetivos del modelo de emisiones en cuestión de aportación, es la extrapolación del mismo para otras localidades de la ciudad e incluso para otros estados que manejen vialidades primarias con características similares para la planeación, desarrollo y control de proyectos de desarrollo urbano en pro de minimizar las emisiones de GEI causadas por el sector transporte. Incluso puede ser una herramienta eficaz para los proyectistas o tomadores de decisiones .

REFERENCIAS

- Ajay, P., Nagaraj, B., Pillai, B.M. et al. Intelligent ecofriendly transport management system based on IoT in urban areas. Springer: Environ Dev Sustain 2022, 24, 5. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02010-x>
- Alexander P. Economopoulos, (2002), Parte 1 “Técnicas para el inventario rápido de la contaminación ambiental”, Serie de Tecnología Ambiental de la OMS, <http://www.bvsde.paho.org/bvsci/fulltext/fuentes.pdf>
- Álvarez, J., (2014), “Modelado de tránsito y optimización del flujo vehicular en paralelo” Tesis., Instituto Politécnico Nacional.
- Banco de Desarrollo de América del Norte (2011). Página web consultada en mayo del 2011 en: http://www.nadb.org/espanol/pdfs/cartera_de_proyectos/FS%20Baja%20California%20AQ_%2007-03%20Span_.pdf.
- Bazan, Jan. Manual de diseño urbano. Trillas. 1998.
- Braess, D., Nagurney, A., & Wakolbinger, T. (2005). “On a Paradox of Traffic Planning”. Transportation Science, 39(4), 446-450. PENDIENTE
- Bull, A. (2003), “El problema y como enfrentarlo”. Congestión de tránsito. http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/27813/S0301049_es.pdf;jsessionid=0E083E63E5EDD0DDCDC322D9BEFC8424?sequence=1
- Centro Mario Molina (2008), Inventario de Gases efecto invernadero, Plan de Acción Climática para el Estado de Baja California, Gobierno del Estado de Baja California, secretaria de Protección al Ambiente, <http://futurocostaensenada.files.wordpress.com/2008/09/efrainnieblas.pdf>.
- Chandler, R. E., Herman, R., & Montroll, E. W. (1958). Traffic Dynamics: Studies in Car Following. Operations Research, 6(2), 165-184.
- Chatzikomis, C.I., Spentzas, K.N. & Mamalis, A.G. Environmental and economic effects of widespread introduction of electric vehicles in Greece. Eur. Transp. Res. 2014, 6, 365–376. <https://doi.org/10.1007/s12544-014-0137-1>
- Christian, A.; Kristian, L.; Björn, A. Global energy scenarios meeting stringent CO2 constraints—cost-effective fuel choices in the transportation sector, Energy Policy 2003, 31, 10, 961-976, ISSN 0301-4215, [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00139-8](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00139-8)
- Corral, Carlos. Lineamientos de diseño urbano. Trillas. 1989.

- Crawford, J. Jordan, C. Dresser, G. (1999). "Modal emissions modeling with real traffic", Texas Transportation Institute.
- Daniel Hernández D., Moisés Galindo D. y José Luis Benites Z., Reporte Técnico: "Atlas de Tránsito Vehicular de la Ciudad de Mexicali", agosto de 2000.
- Del Ángel, E. (2012), "Descripción de las metodologías del IPCC y las guías de buenas prácticas para la elaboración de un inventario de emisiones de GEI"., Taller para la elaboración de inventarios de emisiones de gases efecto invernadero. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Delgado, J., Saavedra, P., & Velasco, R. M. (2011). Modelación de problemas de flujo vehicular. México.
- Díaz, C., Sosa, M. "Movilidad sostenible: Medir el kilometraje recorrido por vehículos mejora la planeación y gestión urbana", Banco Interamericano de Desarrollo (BID), transporte, <https://blogs.iadb.org/transporte/es/movilidad-sostenible-medir-el-kilometraje-recorrido-por-vehiculos-mejora-la-planeacion-y-gestion-urbana/> (accessed on 28 march 2022).
- EPA. (Environmental Protection Agency) (1999). Inventario de emisiones de Mexicali. Consultado en <http://www.epa.gov/ttnca1/dir1/mexicali.pdf> en mayo del 2009.
- EPA. (Environmental Protection Agency). Inventario de emisiones de Mexicali. Consultado en <http://www.epa.gov/ttnca1/dir1/mexicali.pdf> en mayo del 2009. (accessed on 26 February 2022).
- Española, R. A. (2010). Diccionario de la Lengua Española. Recuperado el 18 de 11 de 2011. <http://traficovehicularsibd.weebly.com/index.html>
- Fang, D., Mueller, C. Mortise-and-tenon joinery for modern timber construction: Quantifying the embodied carbon of an alternative structural connection. Springer: Archit. Struct. Constr. 2021, 1. <https://doi.org/10.1007/s44150-021-00018-5>
- Fideicomiso para el mejoramiento de las vías de comunicación, (FIMEVIC). (2001). "Medidas para mejorar la movilidad de personas y bienes", Problemas de movilidad. <http://www.fimevic.df.gob.mx/problemas/2lasmedidas.htm>
- Galindo, M, Benítez, Z, Santos Gómez, M (2005). "Introducción y Antecedentes", Adecuación para flujo continuo de las redes vial troncal de ciudades medias, Mexicali. Proyecto.
- Galindo, M, Ibañez, Y, (2020), UABC, "Determinación de emisiones de GEI causados por líneas de espera vehiculares evitables: caso ciudad de Mexicali". Proyecto.

- García, C. y Manzini, F. (2012), Environmental and economic feasibility of sugar cane ethanol for the Mexican transport sector. *Sol. Energy* 86,1063-1069.
- GARCIA CUETO, O. R. et al. Extreme temperature scenarios in Mexicali, Mexico under climate change conditions. *Atmósfera* [online]. 2013, vol.26, n.4 [citado 2022-07-18], pp.509-520. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-62362013000400006&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0187-6236.
- Gebisa, A.; Gebresenbet, G.; Gopal, R.; Nallamotheu, R.B. Driving Cycles for Estimating Vehicle Emission Levels and Energy Consumption. *Future Transp.* 2021, 1, 615-638. <https://doi.org/10.3390/futuretransp1030033>
- Górka, M.; Bezyk, Y.; Sówka, I. Assessment of GHG Interactions in the Vicinity of the Municipal Waste Landfill Site—Case Study. *Energies* 2021, 14, 8259. <https://doi.org/10.3390/en14248259>
- Guo, Y.; Ma, Z.; Ren, B.; Zhao, B.; Liu, P.; Zhang, J. Effects of Humic Acid Added to Controlled-Release Fertilizer on Summer Maize Yield, Nitrogen Use Efficiency and Greenhouse Gas Emission. *Agriculture* 2022, 12, 448. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040448>.
- Han, X. Naeher, L. (2006), “A review of traffic-related air pollution exposure assessment studies in the developing world”, *Environment International*, volume 32.
- Heidari, E., Bikdeli, S. & Mansouri Daneshvar, M.R. A dynamic model for CO2 emissions induced by urban transportation during 2005–2030, a case study of Mashhad, Iran. *Springer: Environ Dev Sustain* 2022. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02240-7>
- IEA (International Energy Agency) (2013b). 2013 Key world energy statistics, International Energy Agency. Paris, Francia, 82 pp.
- IEA (International Energy Agency), Data and statistics: “CO2 emissions by sector, world 1990-2019”, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySector> (accessed on 10 April 2022).
- INECC, DGICUR, DICA., (2011), “ESTUDIO DE EMISIONES Y ACTIVIDAD VEHICULAR EN BAJA CALIFORNIA, MEXICO”. Reporte Final.
- INEGI (2015). Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2014. consultando el sitio www.objetivosdedesarrollodelmilenio.org.mx, http://www.inegi.org.mx/produccion_servicios/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/aepef/2014/702825063986.pdf en mayo de 2016
- INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. “Censo de población y vivienda 2020”

<https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/bc/poblacion/>
(accessed on 17 March 2022).

- INE-Mexicali, (1999), "Inventario de Emisiones para Mexicali", ICARI.
- INE, (2017), "Manual 1 Principios de medición de la calidad del aire", <http://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1%20Principios%20de%20M edición%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>
- Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGEI) (2006), Instituto Nacional de Ecología (INE) 1990-2006, <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/615/inventario.pdf>
- IPCC (Guidelines for national greenhouse gas inventories). "Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases efecto invernadero". 2014, Vol. 2 Energía. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>
- Jazalevich, A., García, A., Gruter, M., Delgado, J., Diego, U., Suarez, M., Zuk, M., Gonzalez, R., Lents, J. y Davis, N., (2011), An evaluation of the hybrid car technology for the Mexico Mega City. *J. Power Sources* 196,5704-5718.
- Kaida, N., Kaida, K. Spillover effect of congestion charging on pro-environmental behavior. *Environ Dev Sustain* 2015, 17, 409–421. <https://doi.org/10.1007/s10668-014-9550-9>
- Klemm, C., Wiese, F. Indicators for the optimization of sustainable urban energy systems based on energy system modeling. *Springer: Energ Sustain* 2022 Soc 12, 3. <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00323-3>
- Kraus, S.; Grube, T.; Stolten, D. Mobility Trends in Transport Sector Modeling. *Future Transp.* 2022, 2, 184-215. <https://doi.org/10.3390/futuretransp2010010>
- Kumar, R., Mishra, R.K., Chandra, S. et al. Evaluation of urban transport-environment sustainable indicators during Odd–Even scheme in India. *Springer: Environ Dev Sustain* 2021, 23, 17240–17262. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01353-9>
- Lighthill, M. J., & Whitham, G. (1955). On kinetic waves: II) A theory of traffic Flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London, A* (229), 281-345.
- Lozada, I., Islas, S. y Grande, G. (2010), Environmental and economic feasibility of palm oil biodiesel in the Mexican transportation sector. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 14,486-492.
- Mamalis, A.G., Spentzas, K.N. & Mamali, A.A. The impact of automotive industry and its supply chain to climate change: Some technoeconomic aspects. *Springer: Eur. Transp. Res.* 2013, 5, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12544-013-0089-x>
- Mazza, S.; Aiello, D.; Macario, A.; De Luca, P. Vehicular Emission: Estimate of Air Pollutants to Guide Local Political Choices. A Case

- Menchaca, H., Mendoza, A. (2013), "Desempeño de un vehículo híbrido y su contraparte de combustión interna bajo condiciones de manejo de una ciudad mexicana", *Revista internacional de contaminación ambiental*, Vol.29, Num. 2
- Mendoza, A., R. García, M., (2009), "Aplicación de un modelo de calidad del aire de segunda generación a la zona metropolitana de Guadalajara, México", *Revista internacional de contaminación ambiental*, Vol.25, Núm. 2
- Menendez, M.; Ambühl, L. Implementing Design and Operational Measures for Sustainable Mobility: Lessons from Zurich. *Sustainability* 2022, 14, 625. <https://doi.org/10.3390/su14020625>
- Moisés Galindo D., Daniel Hernández D. José Luis Benites Z. y Ma. de los Ángeles Santos G., Reporte Técnico: "Obtención de Patrones de Movimiento del Transporte Público de Pasajeros de la Ciudad de Mexicali", enero de 2002.
- Moisés Galindo D., José Luis Benites Z. y Ma. de los Ángeles Santos G., Reporte Técnico: "Flujos de tránsito vehicular en puntos representativos de la Ciudad de Mexicali", agosto de 2002.
- Moisés Galindo D., Ma. de los Angeles Santos G. y José Luis Benites Z., Reportes Técnico: "Determinación de Volúmenes de Tránsito en Libramiento Mexicali", diciembre de 2002.
- Moisés Galindo D., José Luis Benites Z. y otros, Reporte Técnico: "Estructura troncal de rutas de transporte público de Mexicali, acorde a sus necesidades de viaje", agosto de 2003.
- Moisés Galindo D., Ma. de los Ángeles Santos G. y otros., Reportes Técnico: "Modelo de transporte público de la ciudad de Mexicali", noviembre de 2003.
- Moisés Galindo D., Ma. de los Ángeles Santos G. y otros., Reportes Técnico: "Determinación de un sistema de rutas de transporte público para la ciudad de Mexicali", diciembre de 2003.
- Molina, M. (2007). Inventario de emisiones de gases efecto invernadero del estado de Baja California 2005.
- Moussa, R.R. Reducing carbon emissions in Egyptian roads through improving the streets quality. *Springer: Environ Dev Sustain* 2022, 24, 5. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02150-8>
- Obaid, M.; Torok, A. Macroscopic Traffic Simulation of Autonomous Vehicle Effects. *Vehicles* 2021, 3, 187-196. <https://doi.org/10.3390/vehicles3020012>

- Paulino, F.; Pina, A.; Baptista, P. Evaluation of Alternatives for the Passenger Road Transport Sector in Europe: A Life-Cycle Assessment Approach. *Environments* 2018, 5, 21. <https://doi.org/10.3390/environments5020021>
- PEACC CONACYT, (2013), "Proyecto para desarrollar el programa de cambio climático en el Estado de Baja California", Sector transporte, UABC, Instituto de Ingeniería.
- Pichlmaier, S.; Kult, M.; Wagner, U. Extension of Energy and Transport Scenario Modelling to Include a Life Cycle Perspective. *Future Transp.* 2021, 1, 188-201. <https://doi.org/10.3390/futuretransp1020012>
- PMVT (Plan Maestro de Vilidad y Transporte), Sistema Municipal de Transporte de Mexicali, B. C., XX Ayuntamiento de Mexicali, 2011.
- ProAire, (2011), "Programa para mejorar la calidad del aire en Mexicali 2011-2020", https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/69289/12_ProAire_Mexicali.pdf
- Quintero, M y Vega, A. (2006). Estudio comparativo de tendencias de la calidad del aire de la ciudad de Mexicali 1997-2004 en Quintero, M. Contaminación y Medio Ambiente en Baja California, coordinador. pp. 9-42. UABC. Mexicali.
- Reyna, M., Quintero, M., Collins, K. (2005), "Correlation study of the association of PM10 with the main respiratory diseases in the populations of Mexicali, Baja California and Imperial County, California. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*. Vol. XXVI, número I.
- Sajede, A.; Mohsen, S.; Fahime, M.; Borna, A. Factors affecting the emission of pollutants in different types of transportation. *Energy Reports* 2022, 8, 2508-2529. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.161>.
- Salini, R.; Lenngren, C.A.; Bassi, L.; Baesso, D.P. Greenhouse Gas Assessment and Compensation on Brazilian Low Volume Rural Roads Using CarbonROAD—The Santa Rosa de Lima Case. *Environments* 2015, 2, 489-499. <https://doi.org/10.3390/environments2040489>
- Secretaría de Medio Ambiente Gobierno del Distrito Federal (SEDEMA) (2008). Estudio: "Inventario de emisiones contaminantes criterio de la ZMVM".
- SEDESOL. Manual de proyecto geométrico de vialidades. 2003
- SEMARNAT-INE, (2007), "Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas".
- SENER (2012). Balance nacional de energía 2011, Sub- secretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico. Secretaría de Energía. México, D. F., 159 pp.

- Shokoohyar, S.; Jafari Gorizi, A.; Ghomi, V.; Liang, W.; Kim, H.J. Sustainable Transportation in Practice: A Systematic Quantitative Review of Case Studies. *Sustainability* 2022, 14, 2617. <https://doi.org/10.3390/su14052617>
- Shrestha, R.K., Strahm, B.D. & Sucre, E.B. Greenhouse gas emissions in response to nitrogen fertilization in managed forest ecosystems. *New Forests* 46, 167–193 2015. <https://doi.org/10.1007/s11056-014-9454-4>
- Solís J y Sheinbaum C., (2015), “Consumo de energía y emisiones de CO2 del autotransporte en México y escenarios de Mitigación”, *Revista Internacional de Contaminación del Ambiente*. 32 (1) 7-23, 2016
- Stubenrauch, J.; Garske, B.; Ekardt, F.; Hagemann, K. European Forest Governance: Status Quo and Optimising Options with Regard to the Paris Climate Target. *Sustainability* 2022, 14, 4365. <https://doi.org/10.3390/su14074365>
- Sun, L.; Song, R. Improving Efficiency in Congested Traffic Networks: Pareto-Improving Reservations through Agent-Based Timetabling. *Sustainability* 2022, 14, 2211. <https://doi.org/10.3390/su14042211>
- Turcksin, L., Mairesse, O. & Macharis, C. Private household demand for vehicles on alternative fuels and drive trains: a review. *Eur. Transp. Res.* 2013, 5, 149–164. <https://doi.org/10.1007/s12544-013-0095-z>
- United States Environmental Protection Agency, (2015), “Transportation Sector Emissions”. <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>.
- Universidad Autónoma de Baja California (UABC), (2001). “Un espacio urbano en la estrategia internacional”, *Atlas de Mexicali*.
- Wark, K., Warner, C., (1998), “Contaminación del aire, origen y control”, Editorial: LIMUSA S.A. de C.V., Grupo Noriega Editores.
- Xiaoyu Yan, Roy J. Crookes, Reduction potentials of energy demand and GHG emissions in China's road transport sector, *Energy Policy* 2009, 37, Issue 2, 658-668,ISSN 0301-4215, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.10.008>
- XV Ayuntamiento de Mexicali. Plan Parcial de Desarrollo Río Nuevo. 1997.
- XVIII Ayuntamiento de Mexicali. (2005). Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Mexicali 2025 (PDUCP). Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana de Mexicali.
- Zhang, L.; Kou, C.; Zheng, J.; Li, Y. Decoupling Analysis of CO2 Emissions in Transportation Sector from Economic Growth during 1995–2015 for Six Cities in Hebei, China. *Sustainability* 2018, 10, 4149. <https://doi.org/10.3390/su10114149>