



Estimación de la reducción de emisiones de CO₂ debido a la construcción de Libramientos Carreteros

Juan Fernando Mendoza Sánchez
Héctor Orantes Olvera
Omar Alejandro Marcos Palomares

**Publicación Técnica No. 511
Sanfandila, Qro, 2018**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Estimación de la reducción de emisiones de CO₂
debido a la construcción de Libramientos
Carreteros**

Publicación Técnica No. 511
Sanfandila, Qro, 2018

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por el MC Juan Fernando Mendoza Sánchez y los Ingenieros Omar Alejandro Marcos Palomares, y Héctor Orantes Olvera, investigadores del Grupo de Medio Ambiente.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna II-17/17 “Estimación de la reducción de emisiones de CO₂ debido a la construcción de Libramientos Carreteros”.

Se agradece la colaboración del MC Rodolfo Téllez Gutiérrez por su apoyo y compromiso con el Grupo de Medio Ambiente, así como a la Ing. Verónica Arias de la Subsecretaría de Infraestructura de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes por su valiosa gestión de la información de base del presente proyecto.

Contenido

Índice de figuras		iii
Índice de tablas		vii
Sinopsis		ix
Abstract		xi
Resumen	Ejecutivo	xiii
Introducción		1
Capítulo 1.	Antecedentes	5
Capítulo 2.	Libramientos carreteros	15
Capítulo 3.	Metodología para estimar la reducción de CO2 por la construcción de libramientos carreteros	25
Capítulo 4.	Reducción de CO2 por la construcción de libramientos carreteros	37
Conclusiones		55
Bibliografía		57
Anexos		
	Anexo 1. Fichas técnicas de los libramientos	61
	Anexo 2. Consumo de combustible de los vehículos que circulan en la red de carreteras en México	75

Índice de tablas

Tabla 1.1 Efectos ambientales de la contaminación del aire.....	7
Tabla 1.2 Metas de la SCT del PECC 2009-2012.....	12
Tabla 2.1 Costo unitario de las emisiones de GEI.....	20
Tabla 2.2 Indicador toneladas de CO ₂ por kilómetro por corredor	21
Tabla 3.1 Ficha técnica del Libramiento de la Laguna (Libramiento Norte de Torreón).....	30
Tabla 3.2 Datos viales del Libramiento de la Laguna (Libramiento Norte de Torreón).....	31
Tabla 3.3 Valores de PC y FE	34
Tabla 3.4 Potencial de Calentamiento Global (PCG) de algunos gases	35
Tabla 4.1 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Periférico Pablo García y Montilla (Libramiento de Campeche) – Sentido 1	37
Tabla 4.2 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Periférico Pablo García y Montilla (Libramiento de Campeche) – Sentido 2.....	38
Tabla 4.3 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento Sur de Tuxtla Gutiérrez – Sentido 1	38
Tabla 4.4 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento Sur de Tuxtla Gutiérrez – Sentido 2	39
Tabla 4.5 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento Oriente de Durango – Sentido 1	39
Tabla 4.6 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento Oriente de Durango – Sentido 2	40
Tabla 4.7 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento de Tepic – Sentido 1	40
Tabla 4.8 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento de Tepic – Sentido 2	41

Tabla 4.9 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento de Mazatlán – Sentido 1	41
Tabla 4.10 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento de Mazatlán – Sentido 2	42
Tabla 4.11 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento de Reynosa – Sentido 1	42
Tabla 4.12 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento de Reynosa – Sentido 2	43
Tabla 4.13 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento de la Laguna.....	43
Tabla 4.14 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento San Buenaventura - Hermanas.....	44
Tabla 4.15 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento Poniente Arco Sur de Tecomán	44
Tabla 4.16 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento Suroeste de Durango	45
Tabla 4.17 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento Oriente de la Piedad	45
Tabla 4.18 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento Cd. Valles - Tamuín, Tramo: Tamuín - Tampico	46
Tabla 4.19 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento de Villa de Reyes	46
Tabla 4.20 Estimación de la reducción de CO ₂ eq Libramiento Norponiente de San Luis Potosí.....	47
Tabla 4.21 Resumen de la reducción de CO ₂ eq por Libramiento	48
Tabla 4.22 Resumen de la reducción de CO ₂ eq para Libramientos tipo A2.....	49
Tabla 4.23 Resumen de la reducción de CO ₂ eq para Libramientos tipo A4.....	50
Tabla 4.24 Resumen para obtener el indicador Reducción de CO ₂ eq (Kilotón-Anuales por carril-kilómetro).....	51
Tabla A.1 Ficha técnica del Periférico Pablo García y Montilla (Libramiento de Campeche).....	61
Tabla A.2 Ficha técnica del Libramiento Sur Tuxtla Gutiérrez (Modernizar)	62

Tabla A.3 Ficha técnica del Libramiento de la Laguna (Libramiento Norte de Torreón).....	63
Tabla A.4 Ficha técnica del Libramiento San Buenaventura - Hermanas (Modernización).....	64
Tabla A.5 Ficha técnica del Libramiento Poniente Arco Sur de Tecomán.....	65
Tabla A.6 Ficha técnica del Libramiento Suroeste de Durango.....	66
Tabla A.7 Ficha técnica del Libramiento Oriente de Durango	67
Tabla A.8 Ficha técnica del Anillo Periférico Oriente de la Piedad.....	68
Tabla A.9 Ficha técnica del Libramiento de Tepic.....	69
Tabla A.10 Ficha técnica del Libramiento Cd. Valles - Tampico, tr. Tamuín - Tampico.....	70
Tabla A.11 Ficha técnica del Libramiento Villa de Reyes.....	71
Tabla A.12 Ficha técnica del Libramiento Norponiente de San Luis Potosí (Cuota)	72
Tabla A.13 Ficha técnica del Libramiento de Mazatlán	73
Tabla A.14 Ficha técnica del Libramiento de Reynosa	74

Índice de figuras

Figura 1.1. Evolución de las emisiones de GEI en México.....	6
Figura 1.2. Comportamiento de las emisiones de CO ₂ versus la velocidad	9
Figura 2.1 Beneficios del proyecto de un libramiento.....	18
Figura 3.1 Esquema Top-Down.....	25
Figura 3.2 Esquema Bottom-Up	27
Figura 3.3 Metodología para el inventario de emisiones en carreteras	28
Figura 3.4 Metodología para estimar la reducción de CO ₂ por la construcción de libramientos carreteros.....	29
Figura 3.5 Costos de operación vehicular (Ejemplo).....	32
Figura 4.1 Reducción de CO ₂ eq (kilo-toneladas anuales por carril-kilómetro)	52
Figura 4.2 Reducción de CO ₂ eq por libramiento versus TDPA	52
Figura 4.3 Reducción de CO ₂ eq por carril-kilometro versus TDPA	53

Sinopsis

La presente investigación conceptualiza a los libramientos carreteros y la importancia de contar con ellos dentro de los corredores de transporte ya que permiten desviar el tránsito de paso en las ciudades, de tal manera que se obtengan beneficios para la ciudad y sus residentes, así como para los usuarios del tramo carretero.

Los beneficios ambientales que la construcción de libramientos conlleva son la reducción de emisiones contaminantes y el ruido carretero. El primero de ellos ha formado parte de las políticas nacionales para reducir los gases de efecto invernadero; sin embargo, no se publicaron resultados de la disminución de emisiones, por lo que en este trabajo se desarrolló una metodología que permitiera estimar el ahorro en la emisión de CO₂.

La metodología fue aplicada a varios casos de estudios donde, con base en el ahorro de tiempo de los viajes por el uso del libramiento carretero, se pudo determinar el beneficio ambiental en la reducción de CO₂.

Con los resultados obtenidos se pudieron construir indicadores que representan los ahorros de CO₂ por kilómetro, o por carril kilómetro, los cuales sirven como herramienta para los tomadores de decisiones, ya que a través de éstos pueden determinar los beneficios de los libramientos en cuanto a la reducción de CO₂.

Abstract

This paper conceptualizes road bypasses and the importance of having them within the transport corridors in order to allow diverting road traffic in the cities, in such a way that benefits are obtained for the city and its residents, as well as for the users of the road segment. The main benefits of having highways are shorter travel times and less operation costs for road users and an improvement in safety.

The environmental benefits of the construction of road bypasses are the reduction of polluting emissions and road noise. The first one was part of the national policies to reduce greenhouse gases (Special Climate Change Program 2009-2012), however, no measurements were made to determine the reduction of emissions caused by the decongestion of urban roads. Therefore, in this work a methodology was developed that will allow the estimation of the savings in CO₂ emissions.

The methodology was applied to several case studies, based on the travel time's savings due to the use of the road bypasses, and the environmental benefit in the reduction of CO₂ was determined.

With the obtained results, it was possible to construct indicators that represent the CO₂ savings per kilometer, or kilometer lane, which serves as a tool for decision makers, through which they can determine the benefits of road bypasses in terms of CO₂ reduction. It also includes a graph that, based on the average annual daily traffic, can estimate the emissions that could be reduced by the construction of a new highway. This data is of great importance to justify the construction of road bypasses, particularly for decision makers.

Resumen ejecutivo

Esta investigación realiza un análisis de los beneficios ambientales que la construcción de libramientos carreteros tiene en los corredores de transportes para las ciudades en términos de reducción de CO₂.

La importancia de estudiar las emisiones de GEI generadas por el transporte se da a partir de la preocupación mundial por reducir este tipo de emisiones, debido al gran impacto que el calentamiento global, como efecto del cambio climático, está teniendo en el medio ambiente, en los diferentes sectores y para la población.

Es por ello que, tanto en programas como estrategias de alcance nacional, los gobiernos han establecido metas orientadas a reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), a esto se le conoce como mitigación del cambio climático.

Existen acciones implementadas en México para la reducción de los GEI cuya efectividad repercute a nivel nacional; la construcción de nueva infraestructura carretera es una de ellas, dado que tienen ahorros importantes en los tiempos de viajes, en el consumo energético y en la disminución de emisiones.

Este trabajo aborda la estrategia de la construcción de libramientos y analiza el potencial de reducción de emisiones, de tal manera que se obtengan resultados documentados con metodologías de abajo hacia arriba, con datos medibles, verificables y reportables (MRV) y cuyos resultados podrán utilizarse en el proceso de planeación de la SCT para evaluar el impacto en la reducción de CO₂ debido a la construcción de libramientos carreteros.

La temática de la presente investigación es el ahorro de emisiones de CO₂ por kilómetro, es decir, cuánto se dejaría de emitir al reducir los tiempos de viaje por el uso de libramientos carreteros.

Las emisiones del transporte tienen un efecto local en la calidad del aire cerca del punto donde se generan. Esto incluye áreas urbanas con una gran contribución de tránsito local.

Las zonas urbanas suelen tener problemas de congestionamiento en sus redes viales urbanas, particularmente por la alta concentración de vehículos. Las velocidades bajas contribuyen a un incremento en la generación de emisiones contaminantes. Los análisis que se incluyen en esta investigación dan soporte a la necesidad de disminuir las emisiones contaminantes en las ciudades y aumentar las velocidades de operación.

Las medidas para reducir el impacto de las emisiones del transporte en las concentraciones de contaminantes atmosféricos urbanos pueden ser técnicas o no técnicas. El Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012 (PECC, 2009), consideró como una acción de mitigación de GEI la construcción de 38 tramos carreteros y 18 libramientos, surgiendo entonces la inquietud de evaluar el beneficio de la construcción de libramientos.

Los libramientos carreteros permiten desviar el tránsito de paso en las ciudades, de tal manera que se obtengan beneficios para la ciudad y sus residentes, así como para los usuarios del tramo carretero.

Los principales beneficios de contar con libramientos carreteros son menores tiempos y costos de operación para los usuarios de las carreteras y una mejora en la seguridad. Adicionalmente, los proyectos carreteros -como la construcción de libramientos- producen impactos en la economía, benéficos o adversos, dependiendo de la vocación de la ciudad.

Los residentes suelen tener beneficios de una reducción del congestionamiento en la red urbana primaria, así como una disminución de los efectos ambientales negativos, tales como las emisiones contaminantes. El tener menos congestionamientos promueve una mejora en la movilidad al mejorar la calidad del flujo de tránsito, impactando en una mejora que se refleja en el nivel de servicio que presentan las arterias principales.

La práctica común de evaluar los beneficios de los libramientos carreteros es mediante la estimación de la disminución de los tiempos de viaje, el cual en la evaluación económica y social de proyecto se traduce en la disminución de los costos generalizados de viaje, esto implica ahorro en los tiempos de viajes de conductores, de las mercancías transportadas y los costos de operación de los vehículos.

Es poco común que se evalúen los beneficios ambientales de los proyectos de libramientos carreteros; sin embargo, en México la construcción de estos tramos carreteros se ha considerado como parte de las acciones de mitigación de los gases de efecto invernadero, por lo que resulta importante medir este impacto.

El principal beneficio del cambio climático es la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la reducción de la contaminación del aire.

De acuerdo con el reporte de la Comisión Europea (2015), para estimar el volumen total de emisiones generadas o evitadas por tipo de vehículo para los distintos modos, se debe calcular multiplicando los factores de emisión por los datos del volumen de transporte, teniendo en cuenta consideraciones tales como las relaciones entre la demanda y la capacidad (flujo de velocidad), así como el consumo de combustible y las relaciones de velocidad (en el caso de la carretera).

El ahorro de energía debido a la optimización del sistema debe ser cuantificado para obtener las emisiones de CO₂ generadas o evitadas, las cuales deben monetizarse utilizando el precio sombra del CO₂. De esta manera, la metodología desarrollada en el presente trabajo busca estimar las emisiones en las carreteras y determinar la reducción de CO₂ por el efecto del libramiento carretero.

La estimación de emisiones representa la contabilización del total de gases emitidos de CO₂ o de gases de efecto invernadero, asociados a alguna actividad o sector. Generalmente las emisiones son estimadas a nivel nacional, utilizando las metodologías y los factores de emisión que define el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés). El método *Top-Down* permite estimar las emisiones totales de un área, región o país, mediante la obtención de información estadística para cada una de las actividades.

Con este enfoque, la metodología utilizada para la estimación de emisiones en los libramientos se basó en el ahorro del consumo de combustible que tendrían los vehículos en función del tiempo general de viaje.

Para poder desarrollar una metodología adecuada era necesario contar con información de los proyectos de libramientos que se hayan construido en el presente periodo gubernamental, por lo que la participación de la Subsecretaría de Infraestructura, quien proveyó los datos básicos de cada proyecto carretero, fue relevante.

La metodología que se muestra en la figura siguiente representa una versión simplificada de un enfoque de abajo hacia arriba, dado que se pudo estimar y obtener datos básicos que representan la actividad.

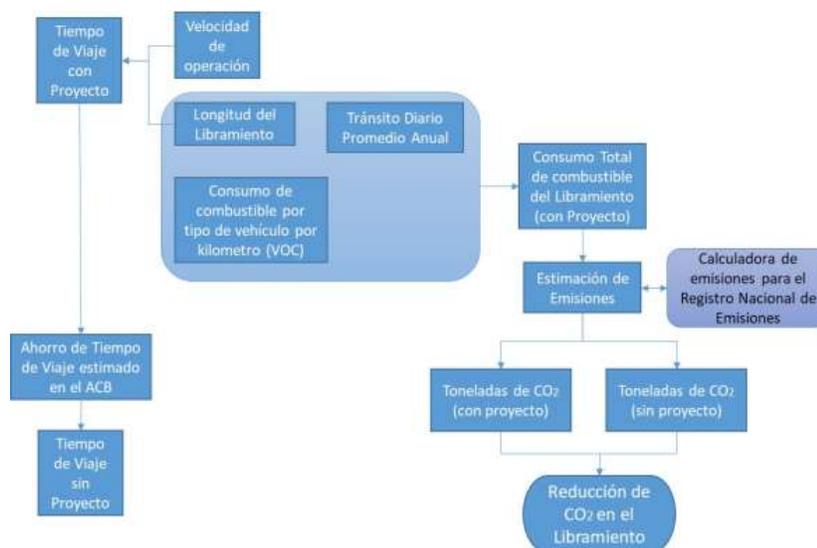


Figura. Metodología para estimar la reducción de CO₂ por la construcción de libramientos carreteros

Con el apoyo de la Subsecretaría de Infraestructura (SSI) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, se obtuvo información de 29 proyectos de libramientos carreteros, de los cuales únicamente 14 cubrieron el total de requerimientos de información.

De acuerdo con la metodología para cada proyecto de libramiento se determinó: nombre del proyecto, velocidad de proyecto; longitud del libramiento; ahorro del tiempo de viaje; tiempo de viaje con proyecto; Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA); consumo de combustible; etc.

La estimación de emisiones está basada en el consumo total de combustibles, mediante el cual se puede determinar a través de factores la cantidad de gases de efecto invernadero, utilizando los factores de emisión del Registro Nacional de Emisiones (RENE) de SEMARNAT.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo se muestran por libramiento; para las carreteras A4 aparecerá un cálculo por sentido, mientras que para las A2 solamente un cálculo, lo cual significa que son carreteras de un cuerpo con dos carriles y ambos sentidos de circulación, y una carretera con uno o dos cuerpos, pero con cuatro carriles, dos para cada sentido de circulación.

La reducción de CO₂ equivalente se muestra en toneladas diarias, con base al TDPA de la carretera. El año de aforo puede variar, sin embargo, para cada caso se tomó el más reciente.

Uno de los primeros hallazgos evidentes es que los libramientos que fueron proyectados como A4 debido al TDPA contribuyen a un mayor impacto en las emisiones, pero el construirlos con un enfoque de reducción de emisiones significa una gran aportación del sector transporte por carretera.

La contribución a la reducción de emisiones de CO₂ eq de las carreteras A4 es cinco veces mayor que las carreteras A2, debido principalmente a su TDPA, en términos de kilo-toneladas anuales por kilómetro.

Para poder tener una comparativa más uniforme, en términos de la reducción de emisiones de CO₂ eq se decidió cuantificar dicha reducción por carril-kilometro, a fin de visualizar de esta manera su comportamiento y con ello tener un indicador que permita a las autoridades basar sus proyecciones de reducción de emisiones en él y, con ello, completar las fichas técnicas de los proyectos de libramientos carreteros con datos más precisos para comunicar los beneficios ambientales de la construcción de Libramientos carreteros.

Para poder calcular los beneficios para cada proyecto se muestra la siguiente figura, la cual es un auxiliar importante, ya que, con el TDPA de proyecto, se pueden estimar los beneficios de reducción de CO₂ eq sin importar la longitud del proyecto carretero y el número de carriles, debido a que el dato estimado se encuentra en kilo-toneladas anuales por carril-kilometro que se pretenda construir.

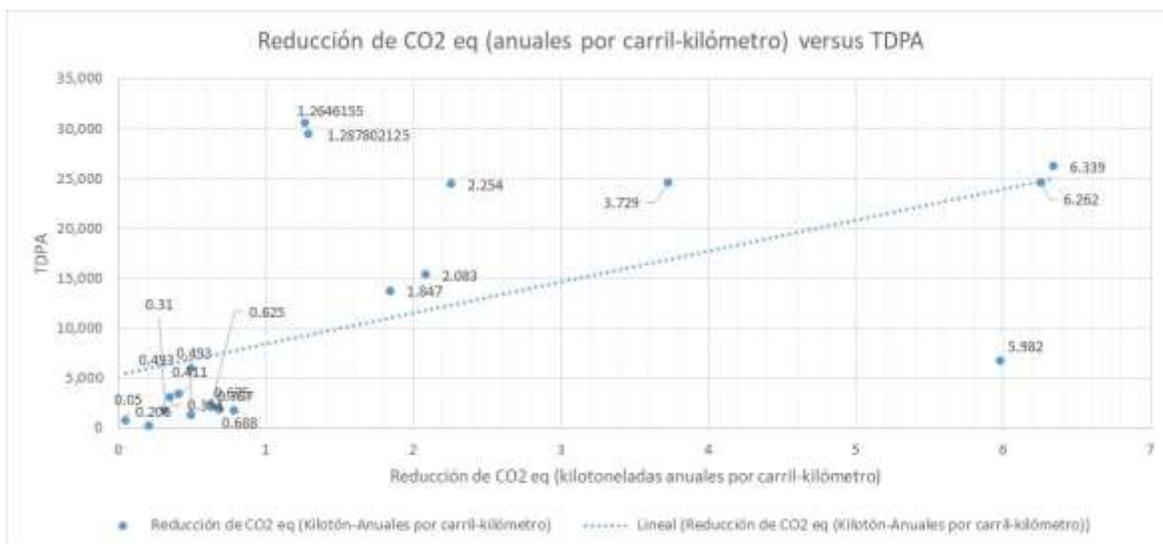


Figura. Reducción de CO₂ eq por carril-kilómetro versus TDPA

Por ejemplo, un proyecto que se pretenda construir con un TDPA de 15,000 vehículo diarios tendría, aproximadamente, un potencial de ahorro de 3.0 kilotoneladas anuales por carril-kilómetro de CO₂ eq, de tal manera que, si el Libramiento fuera un A2 con una longitud de 20 kilómetros, entonces será de 120 kilo-toneladas anuales de CO₂ eq.

Las conclusiones de la investigación muestran cuál ha sido el impacto de la construcción de libramientos carreteros en México, en términos de reducción de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq).

Las estimaciones realizadas han permitido obtener un indicador que refleja los beneficios que tendría la construcción de libramientos carreteros en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Los indicadores obtenidos podrán utilizarse de referencia para futuros proyectos de inversión en libramientos carreteros, mismos que permitirán, si se desea, utilizar la reducción de dióxido de carbono equivalente como parte de la evaluación económica de proyectos, a fin de justificar el beneficio de este tipo de infraestructura.

Para los tomadores de decisiones, así como para quienes realizan la planeación de proyectos en el sector transporte, contar con estos insumos como herramienta para determinar parte de los beneficios que conlleva la construcción de un libramiento carretero es de vital importancia, sobre todo por el gran auge que los temas de cambio climático y de los proyectos de mitigación de gases de efecto invernadero han cobrado en el país.

Aunque la construcción de libramientos también conlleva beneficios ambientales a las ciudades, tales como la disminución de ruido y la reducción de emisiones por el incremento de velocidad en la red principal de las ciudades, debido a una disminución del congestionamiento, dichos impactos no fueron evaluados en esta investigación, pero podría ser la línea futura a seguir para los trabajos de investigación del área de medio ambiente.

De esta manera los trabajos futuros serán continuar con la evaluación de las externalidades que el transporte tiene en el medioambiente.

Introducción

La importancia de estudiar las emisiones de GEI generadas por el transporte se da a partir de la preocupación mundial por reducir este tipo de emisiones, debido al gran impacto que el calentamiento global, como efecto del cambio climático, está teniendo en el medio ambiente, en los diferentes sectores y para la población.

Los gases de efecto invernadero (GEI) son el promotor principal del cambio climático que se ha observado desde el siglo XX, y son producto del estilo de vida y las actividades humanas. Por lo que resulta importante su monitoreo, para conocer a través de indicadores cómo es que se acumulan y calientan el clima, cómo repercuten en la atmósfera terrestre, en los océanos, etcétera.

El desafío en los últimos años para los países, en cuanto a temas ambientales, es la acción global contra el cambio climático. Es por ello que, tanto en programas como estrategias de alcance nacional, los gobiernos han establecido metas orientadas a reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), a esto se le conoce como mitigación del cambio climático.

La mitigación del cambio climático se refiere a los esfuerzos para reducir o prevenir las emisiones de GEI. La mitigación puede significar el uso de nuevas tecnologías o de energías renovables, equipos más eficientes en el consumo de energía, el cambio de las prácticas de gestión o el comportamiento del consumidor.

Existen acciones implementadas en México para la reducción de los GEI cuya efectividad a nivel nacional ha sido probada y que, de acuerdo con las buenas prácticas internacionales, vale la pena continuar implementando, replicando, extendiendo y potencializando por los beneficios que estas acciones han traído al medio ambiente.

Algunas de éstas son:

- Aplicación de normas de eficiencia energética, donde actualmente se tiene la NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2012
- Reducción del consumo de energía en el transporte de carga y pasajeros, donde la SEMARNAT-SCT implementó el programa “Transporte Limpio”
- Programa de Modernización del Autotransporte de Carga y Pasaje, el cual está creado para renovar el parque vehicular del transporte de carga y pasaje federal

- Participación del ferrocarril en el transporte de carga terrestre, acción que resulta un reto importante para la reducción de emisiones de GEI
- Sistemas de transporte público urbano modernos para ciudades mayores a 100 mil habitantes, donde a través del programa de transporte masivo se han financiado diversos proyectos que tienen beneficios potenciales de reducción de GEI.
- Construcción de nueva infraestructura carretera, la cual ha significado ahorros significativos en los tiempos de viajes, en el consumo energético y en la disminución de emisiones, durante el PECC 2009-2012, se construyeron 38 nuevos tramos carreteros y 18 libramientos carreteros con alto potencial de mitigación, algunas obras se encuentran en proceso de ser concluidas, pero los resultados ya han sido evaluados.

Cada una de las estrategias descritas, ya implementadas en México y las que son susceptibles a implementar en un futuro, tienen reducciones de emisiones de GEI; sin embargo, no se encuentra documentados a través de metodologías que midan la reducción, ni tampoco disponen de instrumentos para ser revisadas en el ámbito internacional y verificadas para avalar los resultados.

Éste es el objeto de la presente investigación donde se pretende abordar la estrategia de construcción de libramientos y analizar el potencial de reducción de emisiones, de tal manera que se obtengan resultados documentados con metodologías de abajo hacia arriba, con datos medibles, verificables y reportables (MRV), los cuales podrán utilizarse en el proceso de planeación de la SCT para evaluar el impacto en la reducción de CO₂ debido a la construcción de libramientos carreteros.

La estrategia que aborda la presente investigación es el ahorro de emisiones de CO₂ por kilómetro; es decir, cuánto se dejaría de emitir al reducir los tiempos de viaje por el uso de libramientos carreteros. El proyecto se encuentra alineado a la línea de investigación sobre “Impacto ambiental y cambio climático” de la Coordinación de Infraestructura.

Esta investigación permitirá contribuir al cumplimiento del objetivo 6, “Desarrollar integralmente y a largo plazo al sector con la creación y adaptación de tecnología y la generación de capacidades nacionales” del Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2013-2018, mismo que se encuentra alineado a los objetivos 3.5 “Hacer del desarrollo científico y tecnológico y la innovación pilares en el progreso económico y social sostenible”, el 4.9 “Contar con una infraestructura de transporte que se refleje en menores costos para realizar la actividad económica” y el 4.4 “Impulsar y orientar un crecimiento verde incluyente y facilitador que preserve nuestro patrimonio natural al mismo tiempo que genere riqueza, competitividad y empleo”, del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018.

El primer capítulo muestra parte de los resultados obtenidos de la investigación bibliográfica, donde se plantea el problema sobre cómo las fuentes móviles, es decir, el transporte, en muchos países es la causa principal de la contaminación del aire y del cambio climático. En dicho capítulo se muestra el panorama nacional en cuanto a la generación de emisiones y su tendencia futura. Esta generación de emisiones se aborda particularmente en zonas urbanas, donde las emisiones del transporte tienen un efecto local en la calidad del aire cerca del punto donde se generan. Las zonas urbanas suelen tener problemas de congestión en sus redes viales urbanas y bajas velocidades de operación, por ello la importancia de reducir las emisiones en dichos centros urbanos con diferentes estrategias, las cuales se resumen en este apartado.

Los libramientos carreteros son una alternativa para reducir las emisiones en los centros urbanos, pues permiten desviar el tránsito de paso en las ciudades, de tal manera que se obtengan beneficios para la ciudad y sus residentes, así como para los usuarios del tramo carretero. La descripción de los beneficios y los impactos de los libramientos en las ciudades se detallan en el capítulo 2 del presente trabajo.

Para poder estimar los beneficios o impactos de los libramientos carreteros, se requieren de metodologías que permitan medir dichos impactos. En el capítulo 2 se describe la práctica común de evaluarlos. Incluyendo la estimación de las emisiones en carreteras. Aunque también se expone que no existen mediciones de los beneficios de la reducción de emisiones por la construcción de libramientos carreteros.

El capítulo 3 describe la metodología para estimar la reducción de CO₂ por la construcción de libramientos carreteros, partiendo de una descripción de los tipos de enfoques metodológicos que existen actualmente para la estimar las emisiones en carreteras.

En dicho capítulo se ejemplifica cómo se obtiene la información para cada una de las etapas que componen el proceso metodológico desarrollado para estimar las emisiones en los libramientos carreteros y cómo estimar las reducciones de emisiones de CO₂ equivalente con o sin proyecto, de tal manera que se calcule el beneficio potencial de ahorro anual para cada uno de los proyectos analizados.

Finalmente, el capítulo 4 muestra los resultados obtenidos con la metodología descrita en el capítulo 3. Los resultados se presentan por libramiento, y para las carreteras A4 aparecerá un cálculo por sentido, mientras que para las A2 solamente un cálculo.

La reducción de CO₂ equivalente se muestra en toneladas diarias, con base al TDPA de la carretera. El año de aforo puede variar, sin embargo, para cada caso se tomó el más reciente.

Este capítulo incluye una discusión de los resultados y ofrece a los tomadores de decisiones gráficas y tablas para que puedan utilizar los resultados con el objetivo de que los futuros proyectos de libramientos carreteros cuenten con un insumo para estimar el potencial en la reducción de CO₂ eq.

En conclusiones se expone cuál ha sido el impacto de la construcción de libramientos carreteros en México en términos de reducción de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq). Los resultados mostraron que la reducción de emisiones va asociada directamente al tránsito diario promedio anual que circula en la carretera, de tal manera que las carreteras A4 tienen un mayor beneficio ambiental que una carretera A2.

Estas estimaciones han permitido obtener un indicador que refleja los beneficios que tendría la construcción de libramientos carreteros en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Los indicadores obtenidos podrán utilizarse de referencia para futuros proyectos de inversión en libramientos carreteros, mismos que permitirán, si se desea, utilizar la reducción de dióxido de carbono equivalente como parte de la evaluación económica de proyectos, a fin de justificar el beneficio de este tipo de infraestructura.

1 Antecedentes

La contaminación del aire se presenta cuando en él se introducen sustancias nocivas, tales como partículas y moléculas biológicas, en la atmósfera de la Tierra. El resultado es que pueden causar enfermedades, alergias o la muerte de humanos; aunque también pueden causar daño a otros organismos vivos, como los animales o cultivos alimenticios y afectar el entorno natural o construido. La actividad humana y los procesos naturales propician la contaminación del aire.

El cambio climático se ha convertido, en los últimos años, en uno de los principales desafíos que afronta el planeta, sufriendo consecuencias ambientales actuales y futuras, sobre las cuales los países, regiones y sociedades deben trabajar para atenuar la severidad de los daños.

Las consecuencias ambientales, como el aumento del nivel del mar y el aumento de la temperatura, ha generado otros efectos en el clima y la variabilidad climática, provocando impactos en los seres humanos y los ecosistemas. El efecto invernadero es el fenómeno que explica estas consecuencias ambientales y, el principal precursor de éste, son los gases de efecto invernadero (GEI).

Las fuentes móviles, es decir, el transporte, en muchos países es la causa principal de la contaminación del aire y del cambio climático.

El transporte es un importante contribuyente de dióxido de carbono (CO₂) y otras emisiones de gases de efecto invernadero de la actividad humana, representa aproximadamente el 14 por ciento del total de emisiones antropogénicas a nivel mundial y aproximadamente el 27 por ciento en los EE.UU. (Shaheen, et al, 2007).

El sector del transporte contribuye con pequeñas cantidades de emisiones de CH₄ y N₂O de la combustión de combustibles y gases-F del aire acondicionado de los vehículos. Las emisiones de CH₄ oscilan entre 0.1–0.3% del total de las emisiones de GEI del transporte, las de N₂O entre 2.0 y 2.8%. Mientras que las emisiones de CO₂ del sector del transporte (6.2 GtCO₂-eq en el año 2004) aumentaron aproximadamente un 27% a partir de 1990 y su tasa de crecimiento es la mayor entre los sectores de usuarios finales. En la actualidad, el transporte por carretera asciende al 47% del total de las emisiones de CO₂ relativas al transporte (IPCC, 2007).

De acuerdo con cifras de la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC, 2013), para el año 2010, en México se emitieron a la atmósfera gases de efecto invernadero (GEI) equivalentes a 748 millones de toneladas de CO₂ (MtCO₂e); esto representa un aumento del 33% con respecto a las emisiones de 1990 (véase la figura 1.1).

En el periodo de 2001 a 2010, las emisiones de GEI presentaron una tasa media de crecimiento anual (TMCA) de 2.6%, mientras que el PIB presentó una TMCA de 1.9 por ciento.

De acuerdo con las tendencias y las diversas estrategias de mitigación, se determinó una línea base nacional de GEI, la cual se construyó a partir de los inventarios nacionales del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGEI). Tomando este escenario como base, las emisiones de GEI en México alcanzarían 960 MtCO_{2e} en 2020, 1,276 MtCO_{2e} en 2030 y 2,257 MtCO_{2e} en 2050.

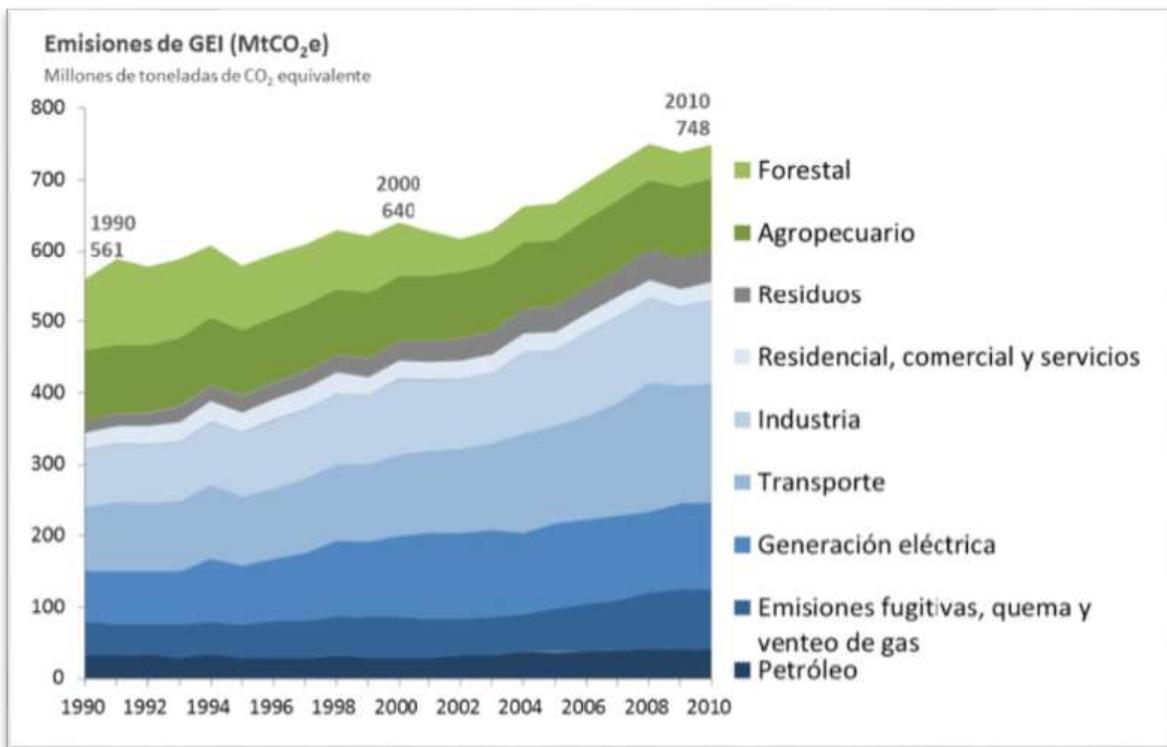


Figura 1.1. Evolución de las emisiones de GEI en México

Fuente: ENCC, 2013. (INE, 2010)

Adicionalmente, la contaminación del aire está considerada como la principal amenaza ambiental que se plantea por la operación del transporte. La tabla 1.1 muestra los principales contaminantes emitidos a la atmósfera y el efecto que éstos tienen en la salud humana, los ecosistemas, el clima y en las estructuras. En dicha tabla se justifica el porqué de la importancia de establecer acciones para mitigar el impacto de las emisiones contaminantes.

Tabla 1.1 Efectos ambientales de la contaminación del aire

Contaminante	Fuente	Efecto sobre:			
		Salud humana	Vegetación	Clima	Estructuras
Monóxido de carbono (CO)	<ul style="list-style-type: none"> • Combustión incompleta 	Inadecuada oxigenación, sistema nervioso, circulación, afecciones cardiacas.	-	De forma indirecta a través de la formación de ozono.	-
Dióxido de carbono (CO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> • Combustión 	-	-	Gas de efecto invernadero, precursor del cambio climático.	-
Hidrocarburos (incluye: metano, isopentano, pentano, tolueno, etc.) (HC)	<ul style="list-style-type: none"> • Combustión incompleta • Carburación 	Algunos son cancerígenos, precursor del ozono.	Acumulado en el suelo daña semillas, alimentos y cultivos.	El metano es un GEI con alto potencial de calentamiento, conduce a la formación de ozono	-
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	<ul style="list-style-type: none"> • La oxidación de N₂ y N-compuestos en los combustibles 	Problemas respiratorios y otros problemas.	Acidificación del suelo y agua, sobrefertilización.	El NO ₂ es un GEI con alto potencial de calentamiento, conduce a la formación de ozono	Desgaste, erosión.
Partículas (PM)	<ul style="list-style-type: none"> • Combustión incompleta • Polvo del camino 	Daños al aparato respiratorio, varios de contenido tóxico	Asimilación reducida.	-	Suciedad, mugre.
Carbón negro (hollín)	<ul style="list-style-type: none"> • Combustión incompleta 	Cancerígeno	-	-	Suciedad, mugre.
Ozono (O ₃)	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidación fotoquímica con el NO_x y los HC 	Problemas respiratorios, envejecimiento de los pulmones	El riesgo de hojas y daño de la raíz, bajo rendimiento de los cultivos.	GEI con alto potencial.	Descomposición de polímeros

Fuente: Kürer, 1993.

Los efectos comentados en la tabla anterior son primarios y derivados del contaminante de forma individual; sin embargo, al combinarse puede generar efectos más severos o mostrarse como otro impacto.

Existen otros contaminantes generados por el transporte, pero su investigación e impacto han sido poco estudiados, por lo que no se cuenta con evidencia científica para demostrar su amenaza ambiental.

1.1 Problemática de las emisiones en zonas urbanas

La contaminación del aire interior y la mala calidad del aire urbano figuran entre los peores dos problemas de contaminación tóxica del mundo, según el reporte "The World's Worst Pollution Problems" realizado por el Instituto Blacksmith (2008)

La Organización Mundial de la Salud estimó en 2012 que cada año a la contaminación del aire se le atribuye la muerte de unos 3 millones de personas en todo el mundo, considerando únicamente el aire urbano (WHO, 2016).

Las emisiones del transporte tienen un efecto local en la calidad del aire cerca del punto donde se generan. Esto incluye áreas urbanas con una gran contribución de tránsito local, pero también en áreas cercanas a puertos marítimos, aeropuertos y terminales ferroviarias.

La calidad del aire en las zonas urbanas está muy influenciada por el tráfico local. La composición vehicular en áreas urbanas es generalmente diferente a la composición nacional, si ésta cuenta con desvíos carreteros.

Las condiciones de congestión del tráfico urbano y los viajes más cortos y más frecuentes pueden dar lugar a emisiones más altas por kilómetro en comparación con los viajes más largos que fluyen libremente.

La presencia de edificios altos a ambos lados de la carretera, que resulta muy común en los centros urbanos, crea un "cañón callejero" que reduce la dispersión de los contaminantes emitidos por las fuentes vehiculares y puede generar concentraciones localmente mayores (EEA, 2012).

Las zonas urbanas suelen tener problemas de congestionamiento en sus redes viales urbanas, particularmente por la alta concentración de vehículos. Las velocidades bajas contribuyen a un incremento en la generación de emisiones contaminantes, así como las demoras en el sistema vial ocasionado por semáforos donde la operación de los motores en modo ralentí contribuye a una mayor cantidad de emisiones.

En un análisis realizado utilizando el modelo HDM-4, se estimaron las emisiones para los vehículos ligeros tipo "A" a diferentes velocidades en múltiplos de 10 Km/h, con las cuales se graficaron el total de emisiones generadas (HC, CO, CO₂, Nox, PM, SO₂). El resultado de este análisis se puede ver en la figura 1.2 "Comportamiento de las emisiones de CO₂ versus la velocidad".

En la gráfica 1.2 se observa cómo las velocidades más bajas producen una mayor cantidad de emisiones, particularmente en el análisis específico realizado para el dióxido de carbono.

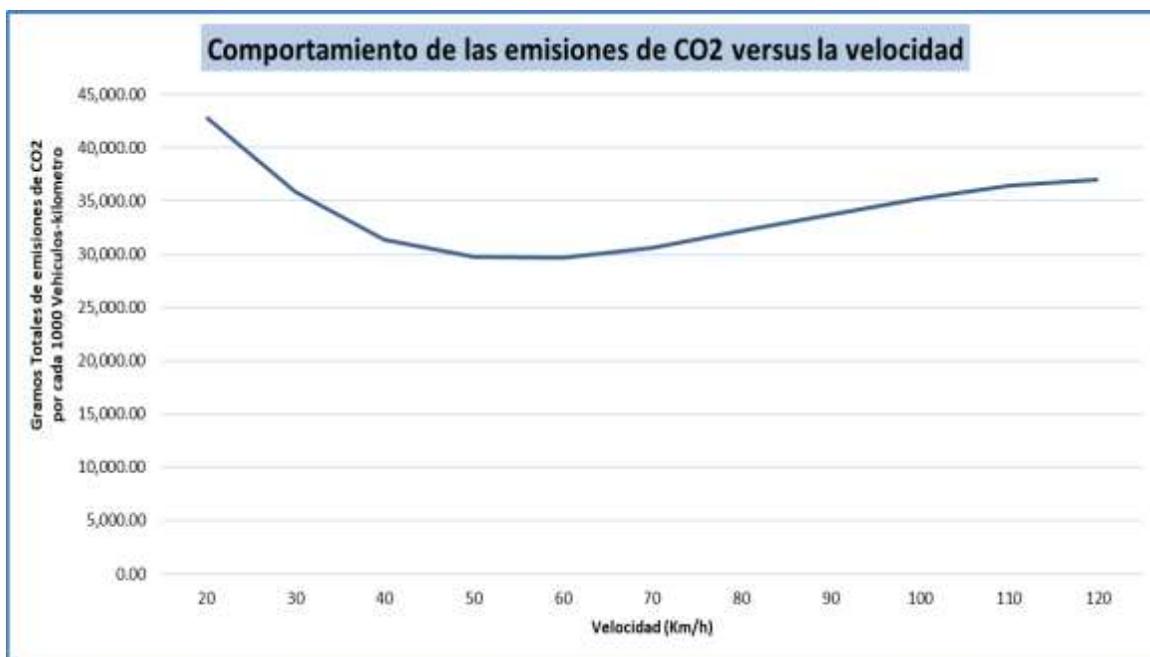


Figura 1.2. Comportamiento de las emisiones de CO₂ versus la velocidad

Fuente: Mendoza&Salazar, 2014 (sin publicar).

Estos análisis dan soporte a la necesidad de disminuir las emisiones contaminantes en las ciudades y aumentar las velocidades de operación.

Adicionalmente, en zonas urbanas densas las emisiones del tráfico vehicular no logran disiparse adecuadamente en tiempo y espacio. Esta mala calidad del aire no permite lograr una quema adecuada del combustible, aumentando la generación de emisiones.

1.2 Reducción de las emisiones

Las medidas para reducir el impacto de las emisiones del transporte en las concentraciones de contaminantes atmosféricos urbanos pueden ser técnicas o no técnicas. Las medidas técnicas pueden incluir diseños más limpios de cámaras de combustión o tecnologías de reducción de descargas, mientras que las medidas no técnicas pueden incluir incentivos para la compra de nuevos vehículos más limpios, fomentar el uso compartido del automóvil para reducir la demanda o restringir el tránsito en ciertas áreas.

Las políticas y acciones locales son esenciales para disminuir las concentraciones de contaminantes en las áreas urbanas, particularmente en la localización de los caminos (EEA, 2012).

Existen tecnologías y estrategias en el sector transporte que permiten reducir las emisiones contaminantes, las cuales se pueden clasificar en:

- Tecnologías en los vehículos.
- Tecnologías en los combustibles.
- Estrategias en la movilidad.
- Sistemas Inteligentes para el Transporte (ITS).
- Comportamiento humano.
- Eficiencia energética.
- Cambio modal.
- Modernización de infraestructura.
- Gestión de la edad de los vehículos.

La práctica internacional ha expuesto resultados de las diferentes estrategias para la reducción de GEI en el transporte en general y, en específico, algunos casos en el transporte de carga, aunque es necesario estimar cuál sería el impacto de mitigación de cada acción susceptible a implementarse, ya que las variables son diferentes en cada región. Conocer los escenarios posibles y los resultados esperados podría tener un panorama más sólido para la toma de decisiones en el sector transportes encaminados a la reducción de estas emisiones.

Las medidas que reducen la congestión del tránsito pueden, por lo tanto, beneficiar la calidad del aire en el área inmediata, aunque es necesario evaluar los impactos completos en un área más amplia para garantizar que el tránsito y las emisiones no se trasladen simplemente a otro lugar.

Varias ciudades han implementado áreas denominadas “Zonas de Baja Emisión” (LEZ, por sus siglas en inglés), las cuales establecen estándares que los vehículos deben cumplir para poder ingresar a esa zona de la ciudad. El ejemplo de Berlín muestra un impacto positivo de la implementación de LEZ. Sin embargo, una investigación reciente llevada a cabo en los Países Bajos concluyó que la introducción de zonas de bajas emisiones dirigidas a vehículos pesados, en cinco ciudades holandesas, no tuvo un efecto mensurable en la contaminación relacionada con el tráfico (Boogaard et al., 2012).

El cobro por congestión se ha introducido en varias ciudades, tales como, Londres, Milán y Estocolmo. Sin embargo, hasta el momento no ha sido posible atribuir una contribución directa en la tasa de congestión a los cambios en las emisiones o a las concentraciones de contaminantes atmosféricos.

En Madrid, por ejemplo, es una de las ciudades donde el gobierno controla las emisiones urbanas mediante la gestión de su flota vehicular, de esta manera los autobuses de transporte público no utilizan diésel, sino que toda la flota funciona con Gas Natural Comprimido (GNC) y el 68% con biodiesel (con una mezcla del 20%).

Las campañas para alentar a los usuarios de los sistemas de transporte en el cambio de conducir vehículos particulares a utilizar la bicicleta o caminar, también pueden reducir la contaminación de la calidad del aire además de otros beneficios, como las mejoras en la salud por el ejercicio físico. El potencial de los esquemas de intercambio de ciclos para ahorrar GEI y otras emisiones nocivas depende de la cantidad de viajes motorizados que han sido reemplazados por bicicletas.

Límites de velocidad más bajos en las autopistas permiten reducir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes, particularmente para los automóviles de pasajeros. Se ha estimado que una reducción del límite de velocidad de la autopista de 120 a 110 km por hora reduciría el consumo de combustible en un 12% para los automóviles diésel y un 18% para los automóviles de gasolina (EEA, 2012).

Se requiere aumentar la tasa de uso de combustibles alternativos en el mercado, incluyendo a la electricidad, biocombustibles de hidrógeno, metano [gas natural comprimido (GNC) y biometano], Gas Licuado (GLP) y otros. Sin embargo, la penetración del mercado depende de la disponibilidad de una infraestructura adecuada, lo que debería estar en consonancia con el desarrollo tecnológico y las tasas de penetración del mercado de los vehículos propulsados por combustibles alternativos (EEA, 2012).

Algunos resultados de la reducción de los efectos ambientales negativos del transporte pueden atribuirse esencialmente a mejoras de eficiencia (incluida la mejora en la logística y el rendimiento de los vehículos, así como a introducción de vehículos más eficientes).

Además de las mejoras en la tecnología, la demanda de transporte también debe optimizarse mediante un cambio modal, trasladando el transporte de modos más dañinos para el medio ambiente a modos menos dañinos para el medio ambiente.

El Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012 (PECC, 2009), consideró como una acción de mitigación de GEI, la construcción de 38 tramos carreteros y 18 libramientos bajo responsabilidad de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

A continuación, se muestra un extracto de lo referido en el Programa Especial de Cambio Climático de ese periodo.

Objetivo 2.2.3 Ampliar y modernizar la red carretera federal a fin de ofrecer mayor seguridad y accesibilidad a la población, contribuir a la integración de las distintas regiones del país, así como reducir los costos de operación vehicular.

Estrategia 1. Desarrollar obras de construcción de nuevos tramos carreteros a fin de contribuir a la modernización estratégica de la red carretera federal.

Línea de Acción:

- SCT. Llevar a cabo la construcción de nuevos tramos carreteros que contribuyan a la integración de las distintas regiones del país.

Estrategia 2. Llevar a cabo un amplio programa de construcción de libramientos y accesos carreteros a ciudades principales a fin de mejorar la conexión de la infraestructura carretera con la infraestructura urbana, contribuyendo al reordenamiento urbano y la **disminución de emisiones ocasionada por la descongestión de vialidades urbanas.**

Línea de Acción:

- SCT. Llevar a cabo la construcción de libramientos, complementados por entronques, distribuidores y accesos a fin de darle continuidad al tránsito de largo itinerario.

Como se puede observar, la estrategia 2 señala claramente que la construcción de libramientos fue una política del gobierno federal y del sector transporte para disminuir las emisiones de GEI que se ocasiona en las vialidades urbanas. La tabla 1.2 muestra las metas de dicho programa.

Tabla 1.2 Metas de la SCT del PECC 2009-2012

Metas	Responsable(s)	Tipo de Meta
Reducir anualmente las emisiones de GEI por la construcción de 38 tramos carreteros nuevos: 1.20 MtCO ₂ e /año (en 2012).	SCT	REMI.4
Reducir anualmente las emisiones de GEI por la construcción de 18 libramientos nuevos: 0.10 MtCO ₂ e /año (en 2012).	SCT	REMI.5

Fuente: PECC, 2009

El problema para el cumplimiento de la meta fue contar con mecanismos MRV (Medibles, Revisables y Verificables), de tal manera que los beneficios ambientales obtenidos sobre reducción de GEI no fueron publicados; sin embargo, siempre se consideró que estas acciones sí tenían un impacto en la reducción de emisiones y que valía la pena continuar con dichas acciones e implementar un mecanismo metodológico que ayudara a medir su impacto en la disminución de dióxido de carbono equivalente.

De esta manera el capítulo siguiente realiza una revisión bibliográfica de los beneficios que tiene la construcción de libramientos para que, con base en ello, se puedan cuantificar dichos beneficios.

2 Libramientos carreteros

Los libramientos carreteros permiten desviar el tránsito de paso en las ciudades, de tal manera que se obtengan beneficios para la ciudad y sus residentes, así como para los usuarios del tramo carretero.

Caminos y Puentes Federales (CAPUFE, 2002) define a un libramiento como un tramo carretero que tiene como función, conectar en forma directa la entrada y la salida de una población. Las características de un libramiento de cuota son: uno o dos cuerpos, con dos carriles como mínimo por cuerpo, barrera central y accesos directos en ambos sentidos o direcciones de comunicación.

Para el Departamento de Transporte de California (2006), un Libramiento es una carretera que permite que el tránsito evite total o parcialmente el paso por un área urbana.

La construcción de un libramiento obedece a diferentes factores que los tomadores de decisiones en la planeación de carreteras deben considerar, tales como:

- ¿La ruta forma parte del sistema carretero principal?
- Demora futura actual y proyectada para el público viajero por el movimiento de personas y bienes a través del área, incluida la duración de los retrasos recurrentes, no recurrentes y estacionales o basados en eventos.
- Número de vehículos pesados.
- Disponibilidad de terrenos en la ciudad que permita modificar el uso del suelo, así como que el plan de desarrollo urbano pueda contemplar la compatibilidad con el corredor carretero.
- Opciones para evaluar distintas alternativas que permitan considerar el impacto ambiental.

Sin embargo, el tema principal deberá evaluar los impactos para asegurar que se obtengan los beneficios deseados.

2.1 El impacto de los libramientos carreteros

Según Anderson et. al. (1992), los principales beneficios de contar con libramientos carreteros son menores tiempos y costos de operación para los usuarios de las carreteras y una mejora en la seguridad. Los libramientos reducen el ruido ambiental del tráfico para los residentes y peatones en las vías urbanas primarias.

Adicionalmente, los proyectos carreteros como la construcción de libramientos producen impactos en la economía, tales como: (a) creación de empleos y beneficios en los ingresos de la nueva infraestructura, (b) impactos directos por la reducción de los costos del transporte y sus demoras e (c) impactos indirectos para los no usuarios.

Estos no usuarios son, principalmente, los residentes de las ciudades, los cuales se benefician de una reducción del congestionamiento en la red urbana primaria, así como una reducción de los efectos ambientales negativos, tales como las emisiones contaminantes.

La disminución de los congestionamientos promueve una mejora en la movilidad, al mejorar la calidad del flujo de tránsito, impactando en una mejora que se refleja en el nivel de servicio que presenta las arterias principales.

La seguridad para los residentes se ve reflejada al no circular junto a los vehículos pesados. Las estadísticas de colisión de California pueden no reflejar una mejor seguridad, sin embargo, los desvíos pueden mejorar la percepción de seguridad, que es un beneficio en sí mismo (CALTRANS, 2006).

Los propietarios de negocios del área pueden temer reducciones potenciales en las ventas, mientras que los líderes cívicos pueden esperar volver a desarrollar el centro o promover el desarrollo a lo largo del nuevo libramiento (CALTRANS, 2006). Sin embargo, también se ha detectado un aumento de las ventas debido a la reducción del congestionamiento y la facilidad de estacionamiento que se presenta en las arterias principales por la construcción de un nuevo libramiento.

Siempre existirá la opción de reubicarse para aquellas empresas de servicios que proveen a los usuarios de las carreteras; sin embargo, es un impacto negativo por los costos que deben incurrir para localizarse en otro punto.

Un tránsito diario promedio alto y un alto número de camiones pueden inhibir el turismo. En estos casos, los Libramientos pueden eliminar los camiones y el exceso de tráfico, aumentando el atractivo de las comunidades como destinos turísticos.

Cuando inicia operaciones un libramiento carretero, es posible para las ciudades comenzar con obras de rehabilitación de la avenida principal, aprovechando la disminución del tránsito.

Los nuevos tramos carreteros que integran los Libramientos resultan atractivos para la industria, ya que en ella pueden instalar nuevos sitios para la producción, alejados del centro urbano, pero conectado al sistema carretero, cuya accesibilidad atrae las inversiones. Esto representa que indirectamente el Libramiento induce el crecimiento de la región. Pero también estos cambios de uso del suelo aledaño a los libramientos, por los nuevos desarrollos, traerán consigo impactos ambientales, modificando los componentes naturales.

Un estudio realizado por la Universidad del Sur de Florida (2011) identificó que en el nuevo emplazamiento en donde se localizará el Libramiento también trae impactos para la movilidad local de la comunidad, además de impactos naturales y culturales.

El impacto en la logística del transporte de mercancías es en la confiabilidad en los tiempos de viaje al evitar el paso por el centro urbano.

La evidencia sugiere que, en la mayoría de los casos, los desvíos de carreteras han resultado en beneficios de desarrollo económico para las ciudades que han sido pasadas por alto. Las ciudades pequeñas (menos de 2,500 habitantes) generalmente están en mayor riesgo de impactos económicos adversos (comercio y empleo generados por carreteras) de una carretera de circunvalación que las ciudades medianas y más grandes; sin embargo, continúan sobreviviendo (Parolin, 2011).

Los impactos sociales de libramiento carretero en una comunidad desviada son generalmente muy positivos; existe una percepción, por parte de los residentes y las empresas en las comunidades desviadas, de que el libramiento es muy importante para la calidad de vida en sus comunidades y para el medio ambiente de éstas.

2.2 La medición del impacto de los libramientos carreteros

La práctica común de evaluar los beneficios de los libramientos carreteros en mediante la estimación de la disminución de los tiempos de viaje, el cual en la evaluación económica y social de proyecto se traduce en la disminución de los costos generalizados de viaje, esto implica ahorro en los tiempos de viajes de conductores y de las mercancías transportadas y los costos de operación de los vehículos.

La figura 2.1 desarrollada por el Centro de Estudios para la Preparación y Evaluación Socioeconómica de Proyectos (CEPEP, 1996) muestra el beneficio social neto de un proyecto de libramiento durante la hora de baja demanda (sin congestión) y el área sombreada representa los beneficios netos.

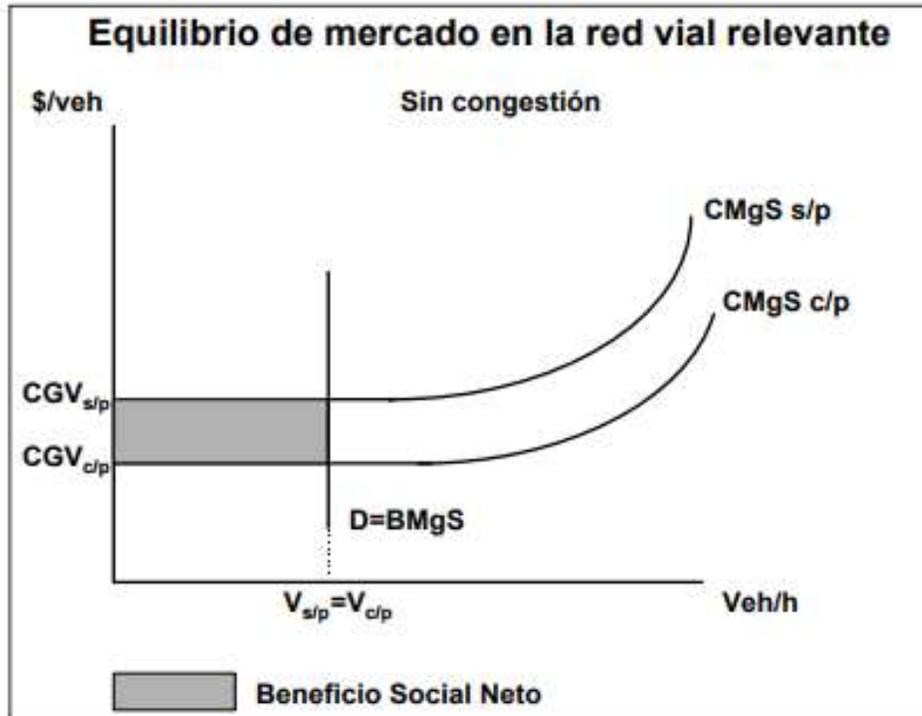


Figura 2.1 Beneficios del proyecto de un libramiento

Fuente: CEPEP, 1996.

Otros estudios han estimado el impacto económico que la construcción de libramientos tiene, particularmente para medir los cambios en las ventas de los negocios que ofrecen servicios a los usuarios de las carreteras (MIDWEST, 1995). Este tipo de estudio divide en análisis de las ventas por tipo de negocio que tuviera atribuciones al libramiento en un periodo comparable, a través de encuestas.

La Universidad de Kentucky (2001), realizó un estudio que evalúa el impacto de los libramientos en la economía local y la calidad de vida. El análisis incluyó el crecimiento del empleo, crecimiento económico, involucramiento del público, impacto ambiental, uso del suelo, congestionamiento, tamaño de la ciudad, inventario de edificios, industria minorista, construcción del libramiento, etc. Los principales hallazgos fueron: reducción de las ventas en los negocios, pero no tuvieron afectación en los empleos en general. Existe un crecimiento de empleos si el libramiento permite accesos a la ciudad, mejora el flujo del tránsito y promueve el crecimiento en la ciudad; la calidad del aire se ve afectada por la mayor localización de empresas en los nuevos libramientos, entre otros aspectos. En el análisis específico para la parte ambiental, se identificó que existe mejoras en la calidad del aire de la ciudad por la reducción del tránsito que circulaba por las avenidas principales y que ahora utilizan el libramiento.

Es poco común que se evalúen los beneficios ambientales de los proyectos de libramientos carreteros; sin embargo, en México la construcción de estos tramos carreteros se ha considerado como parte de las acciones de mitigación de los gases de efecto invernadero. En el siguiente apartado se describen algunos de los pocos trabajos que se identificaron que han evaluado y medido los beneficios.

2.3 Beneficios de los libramientos al cambio climático

El principal beneficio del cambio climático es la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la reducción de la contaminación del aire. El tránsito carretero contribuye significativamente a la superación de los estándares de calidad del aire en muchas ciudades y otras áreas urbanas.

En la Unión Europea (UE) han evaluado cómo considerar la variación de las emisiones de GEI y contaminantes criterio (EC, 2015). Cualquier Análisis Costo-Beneficio (ACB) debe integrar el costo económico del cambio climático como resultado de las variaciones positivas o negativas de las emisiones de GEI.

El cambio climático tiene un impacto global y el costo relacionado no depende de la ubicación de la inversión (como sucede en cambio para los contaminantes del aire o contaminantes criterio).

De acuerdo con el reporte de la Unión Europea, para estimar el volumen total de emisiones generadas o evitadas por tipo de vehículo para los distintos modos, se debe calcular multiplicando los factores de emisión por los datos del volumen de transporte, teniendo en cuenta consideraciones tales como las relaciones entre la demanda y la capacidad (flujo de velocidad), así como el consumo de combustible y las relaciones de velocidad (en el caso de la carretera).

El ahorro de energía, debido a la optimización del sistema, debe ser cuantificado para obtener las emisiones de CO₂ generadas o evitadas, las cuales deben monetizarse utilizando el precio sombra del CO₂.

Un valor monetario que refleje el cambio climático, o el costo de la contaminación de diferentes tipologías de infraestructuras energéticas, debe atribuirse al volumen incremental de contaminantes producido por el proyecto contra el valor base. Un estudio de referencia clave que proporciona los valores unitarios de los contaminantes atmosféricos producidos por las infraestructuras energéticas en los Estados miembros de la UE es Extern-E268 a través de su modelo integrado de evaluación del impacto ambiental.

En cuanto al cambio climático, se sugiere utilizar los valores del precio sombra del CO₂ que se determinaron en Europa y que se ilustran en la tabla 2.1

Tabla 2.1 Costo unitario de las emisiones de GEI

Escenario	Valor en el año 2010 (Euro/Ton-CO ₂ eq)	Incremento Anual (2011-2030)
Alto	40	2
Central	25	1
Bajo	10	0.5

Fuente: EC, 2015

Para determinar el costo externo de las emisiones del cambio climático, se debe aplicar la siguiente fórmula simplificada:

$$\text{Costo de la emisión de GEI} = \text{VGHG} * \text{CGHG}$$

Dónde:

VGHG, es el volumen incremental de emisiones de GEI producido por el proyecto, expresado en equivalentes de CO₂;

CGHG, es el precio sombra unitario (costo del daño) del CO₂, actualizado y expresado a los precios del año en el que se realiza el análisis.

2.4 Estimación de emisiones en carreteras

Estimar las emisiones en las carreteras es un tema estudiado en muchos países, en los cuales utilizan diferentes metodologías y modelos para obtener las emisiones.

Por ejemplo, en un estudio realizado en la India donde llevaron a cabo una estimación de la huella de carbono que representaron varios proyectos carreteros en cada una de sus etapas: construcción, operación y mantenimiento (ADB, 2010). En todo el ciclo de vida, la etapa que más aporta al impacto del aire es la operación.

Existen básicamente dos estrategias: las denominadas Top-Down, es decir metodologías de arriba hacia abajo, y las *Bottom-Up*, que son metodologías de abajo hacia arriba, las cuales se detallan en el capítulo 3.

La dirección indica el sentido en que se realiza la estimación de emisiones, que puede ser una forma puntual hasta llegar a lo general, o viceversa. La selección de cada herramienta depende en gran medida de la disponibilidad de información, pero también del objetivo que persigue el inventario de emisiones que se desea producir.

Los modelos más utilizados para la estimación en México fueron el MOBILE desarrollado por la Agencia para la protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), el cual fue sustituido recientemente por el MOVES. Mientras que en

Europa es utilizado el COPERT, el cual fue desarrollado por la agencia europea de medio ambiente, y es utilizado ampliamente para la estimación de emisiones y la integración de inventarios.

Los estudios realizados por el IMT se han basado en la utilización del Submodelo de Efectos Ambientales y Sociales (SEA), del *Highway Development and Management System*, conocido como HDM-4, por sus siglas en inglés.

La utilización del HDM-4 es útil debido a que este desarrollo informático está concebido para carreteras y es, precisamente, el objeto de este estudio estimar las emisiones del transporte carretero en los principales corredores de transporte de carga en el país.

Con base en dicho modelo y en la metodología *Bottom-up* descrita en el capítulo 3 se realizó un inventario de emisiones en los principales corredores de transporte de carga en México, cuyos resultados se muestran en la sección siguiente.

2.4.1 Emisiones en los corredores de transporte en México

En los corredores carreteros del país, denominados como “corredores de transporte” son los que mayor aporte tienen en la generación de emisiones contaminantes en el transporte interurbano. Por ello el IMT ha realizado diversos trabajos que han permitido estimar la generación de emisiones en las carreteras.

En un estudio realizado por el IMT se estimaron las toneladas de CO₂ por kilómetro en los 16 corredores del transporte del país (ver tabla 2.2).

Tabla 2.2 Indicador toneladas de CO₂ por kilómetro por corredor

Número identificador del corredor	Nombre del corredor	Longitud del corredor (kilómetros)	Emisiones de CO ₂ (toneladas)	Indicador 1 “Toneladas de CO ₂ por kilómetro”
1	México-Nuevo Laredo	1155.61	11562.65	10.01
1.1	• Ramal a Piedras negras	316.41	683.30	2.16
2	México-Cd Juárez	2003.14	9261.34	4.62
3	México-Nogales	2437.46	7819.74	3.21
3.1	• Ramal a Tijuana	761.13	1492.05	1.96
4	Manzanillo – Tampico	1364.27	5763.98	4.22
4.1	• Ramal a Lázaro Cárdenas	609.69	1931.41	3.17
5	México-Veracruz	389.16	2851.22	7.33
6	Veracruz-Monterrey con ramal a Matamoros	1291.32	3529.8	2.73
7	Puebla-Oaxaca-Cd. Hidalgo	1095.14	2426.00	2.22
8	México-Puebla-Progreso	1302.35	6583.62	5.06
9	Peninsular de Yucatán	1203.24	1479.01	1.23

10	Corredor del Pacífico	2045.48	1798.29	0.88
11	Mazatlán-Matamoros	1348.29	4051.93	3.01
12	Transpeninsular de Baja California	1878.61	1821.57	0.97
13	Altiplano	587.15	2435.22	4.15
14	Acapulco-Tuxpan	1022.84	3583.23	3.50
14	Acapulco-Veracruz	766.81	2974.23	3.88
16	Circuito Transístmico	799.57	1862.87	2.33

Fuente: Mendoza&Trejo, 2015

Los resultados permitieron identificar los corredores carreteros que mayor aportación tiene a la generación de emisiones y, con ello, construir indicadores que representen el impacto de la operación del transporte, tales como las “Toneladas de CO₂ por kilómetro”.

Los vehículos y equipos propulsados por diésel representan casi la mitad de todos los óxidos de nitrógeno (NO_x) y más de dos tercios de todas las emisiones de partículas suspendidas (PM) de las fuentes de transporte (UCS, 2002).

Los corredores de transporte contribuyen al impacto ambiental en las ciudades, debido a que varios de los tramos carreteros que lo integran atraviesan zonas urbanas, aumentando la problemática ambiental en ellas.

Aunque el análisis incluye a los libramientos carreteros, no estima las reducciones de emisiones de usar una ruta alterna que considere cruzar el centro urbano.

2.5 Estimación de emisiones en libramientos carreteros

Los proyectos de libramientos carreteros cuando se presentan a la prensa, algunos de ellos difunden información sobre los beneficios ambientales que tendrán, especificaciones en la disminución de emisiones. A continuación, se señalan algunos ejemplos:

• Autopista Arco Norte

La conexión carretera entre los estados de Puebla, Tlaxcala, México e Hidalgo, a través de la **autopista Arco Norte**, generará una notable disminución de unidades de transporte de carga que pasan por el Distrito Federal para ir a sus destinos.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) estima que una vez que la autopista esté en su máximo funcionamiento, dejarán de transitar anualmente por la zona metropolitana un millón de vehículos pesados y, por ende, la disminución de **108 mil toneladas de dióxido de carbono (CO₂) al año** (<http://wradio.com.mx>, 9 de enero de 2010).

• Libramiento Oriente de Chihuahua

Esta obra es de gran impacto regional y nacional porque fortalece el sistema carretero de altas especificaciones en la zona norte del país, que da continuidad al Eje Troncal México-Querétaro-Ciudad Juárez.

Con su operación será posible evitar el paso de camiones de carga por las calles de la capital del estado, mejorar la calidad de vida de sus habitantes al **abatirse problemas de contaminación**, de ruido y de accidentes viales, permitirá reducir los tiempos de recorrido, al cruzar la ciudad en tan sólo 25 minutos.

La obra entregada es una vía de altas especificaciones con nuevos señalamientos en sus 42.3 kilómetros de longitud de 12 metros de ancho, con dos carriles de circulación, amplios acotamientos de 2.5 metros cada uno (<http://www.sct.gob.mx>, 15 de abril de 2015).

• Macrolibramiento de Querétaro

La vía, denominada “Centenario de la Constitución”, consta de 86 kilómetros y beneficia a más de un millón de habitantes, Los 13 mil 200 vehículos, que representan el tránsito promedio diario, obtienen ahorros en tiempos de recorrido de 60 minutos. El Macrolibramiento Inicia en Palmillas de la autopista México-Querétaro y termina en Apaseo El Grande, Guanajuato.

Esta obra de infraestructura de altas especificaciones permite mejorar condiciones de movilidad del corredor industrial San Juan del Río, Querétaro, y agiliza la conectividad del Bajío. Esto detonará el surgimiento de mayores actividades económicas, además de que **dejan de pasar camiones pesados y tráfico de largo itinerario por Querétaro** y San Juan del Río, tomando en cuenta que, de acuerdo con estimaciones, las unidades que circulan por el Macrolibramiento 80 por ciento corresponden a vehículos de carga y 20 por ciento ligeros uno (<http://www.sct.gob.mx>, 20 de diciembre de 2017).

• Libramiento Cabo San Lucas-San José del Cabo

La construcción del libramiento permitirá que la fluidez de traslado en tierra para el turismo nacional y extranjero se convierta en un plus a los atractivos del estado de Baja California, pues mejora sustancialmente la movilidad vehicular de esta ciudad y sus sitios turísticos.

Derivado de su próxima puesta en marcha, los vehículos que circulen por esta vía obtendrán una considerable **reducción en tiempos de traslado y en costos de operación**, por lo que consecuentemente aumentará la seguridad vial al evitar que coincida el tránsito de largo itinerario con el tránsito local.

Como se puede observar en todos ellos se hablan de los beneficios que el Libramientos tendrá para la operación del transporte. Algunos específicamente hablan de los beneficios en la reducción de CO₂, otros de reducciones de los tiempos de viaje o de los costos de operación vehicular, estos dos últimos también implican una reducción del consumo de energía y, por lo tanto, un impacto en la reducción de emisiones.

Sin embargo, no existe evidencia disponible de cómo cuantificar dichos ahorros y cómo calcularlo en término del impacto en la reducción de emisiones, por ello surge la necesidad, en el presente trabajo, de desarrollar un procedimiento metodológico para estimar dichos beneficios ambientales en términos de reducción de CO₂.

3 Metodología para estimar la reducción de CO₂ por la construcción de libramientos carreteros

La estimación de emisiones representa la contabilización de total de gases emitidos de CO₂ o de gases de efecto invernadero, asociados a alguna actividad o sector.

Generalmente las emisiones son estimadas a nivel nacional, utilizando las metodologías y los factores de emisión que define el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés). La figura 3.1 muestra el enfoque del arriba hacia abajo, conocido como *Top-Down*.

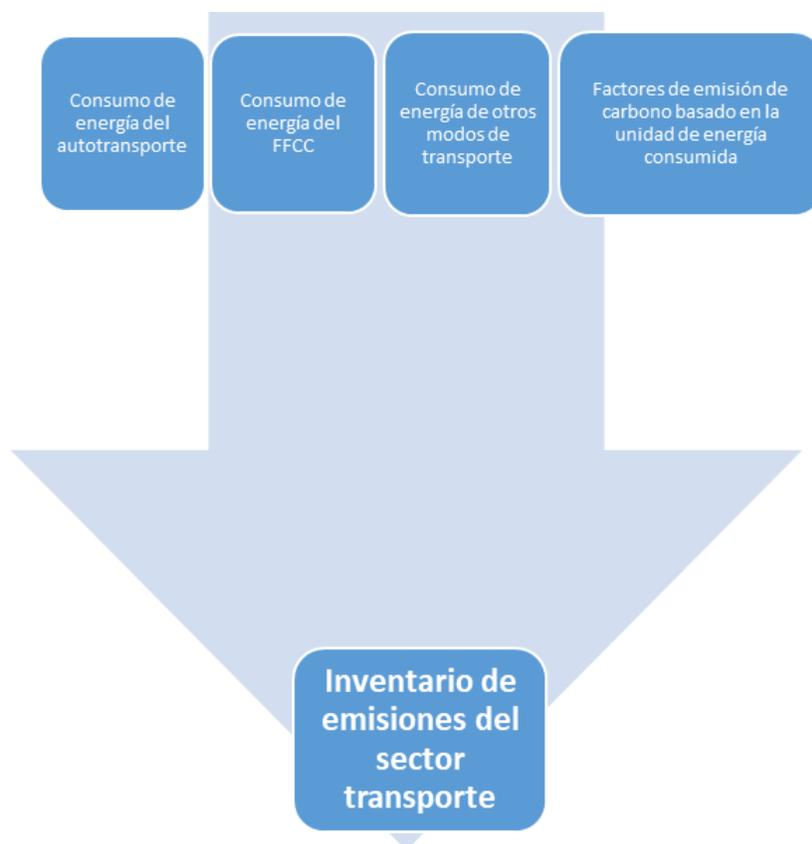


Figura 3.1 Esquema *Top-Down*

Fuente: Elaboración propia

El método *Top-Down* permite estimar las emisiones totales de un área, región o país, mediante la obtención de información estadística para cada una de las actividades; su desarrollo requiere menos información.

El IPCC utiliza este tipo de metodologías, donde cada país reporta el consumo de energía para cada uno de los sectores y subsectores y, de acuerdo con los factores de emisión de carbono para cada uno de ellos, se calcula el total de emisiones.

Solo pocos países reportan con base en este esquema las emisiones generadas por el sector transporte. En México, el sector transporte es una de las fuentes con mayor contribución de GEI, el cual representa el 33% del total nacional, con 166.4 MtCO₂eq emitidas en 2010 (5ta. Comunicación Nacional), del cual 31.1% son emisiones de CO₂. Las emisiones de GEI, en 2006, por modalidad de transporte fueron para el autotransporte 94.5% (157.2 MtCO₂eq), marítimo 1.4% (2.3 MtCO₂eq), ferroviario 1.2% (1.9 MtCO₂eq), eléctrico (no significativo) y el aéreo 2.9% (4.8 MtCO₂eq).

Sin embargo, para un análisis más fino de emisiones, se requiere de un enfoque de abajo hacia arriba.

El concepto *bottom-up* estima las emisiones totales para un área o región, mediante la suma de las emisiones de todas las actividades individuales. Esta metodología requiere el uso de información detallada de cada una de las fuentes de emisión individuales para integrar el inventario, por ejemplo, el factor de emisión vehicular de cada unidad automotor.

Para conocer las emisiones con detalle de cada una de las emisiones es necesario un número importante de información y muchos cálculos para realizar las estimaciones.

Para un inventario de emisiones vehiculares basados en la metodología *bottom-up* se requiere información como: un factor de emisión de acuerdo con el número de vehículos, edad de los vehículos y el tipo de vehículo; las distancias recorridas para cada tipo de vehículo; los datos para caracterizar ambientalmente la zona de estudio, tales como altitud, temperatura, etc.; y el estado de la red vial, como la superficie del pavimento, las velocidades de operación, etc. El esquema de la figura 3.2 representa la metodología *bottom-up*.

Mediante este enfoque Mendoza & Salazar (2014) realizaron un inventario de emisiones en los principales corredores de transporte carretero en México. La metodología utilizada emplea el submodelo de Emisiones Ambientales (SEA), del *Highway Development and Management System* conocido como HDM-4, por sus siglas en inglés.

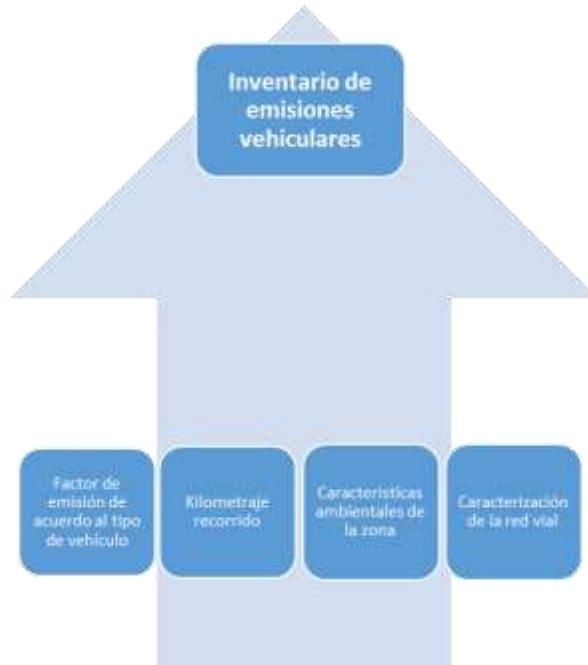


Figura 3.2 Esquema *Bottom-Up*

Fuente: Elaboración propia

La metodología planteada para la estimación de emisiones en carreteras se basa en tres etapas.

El trabajo principal se centra en la primera etapa, donde se requiere recopilar la información de los datos del tránsito de los corredores de transporte, obtener la información de la geometría del camino, caracterizar la flota vehicular que circula en él, así como obtener la información ambiental de la zona donde se ubica cada tramo del camino y el estado superficial del mismo.

La etapa 2 es la alimentación del modelo HDM-4 para realizar los análisis necesarios.

Finalmente, la etapa 3 son los resultados de las emisiones derivadas del análisis del modelo. El presente trabajo estima las emisiones siguientes: hidrocarburos, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, monóxido de carbono, dióxido de carbono y partículas suspendidas.

Como procesos alternativos se maneja el aseguramiento de la calidad de acuerdo con los estándares establecidos y, finalmente, se definen los resultados del inventario.

La figura 3.3 muestra la metodología para emisiones en carreteras.

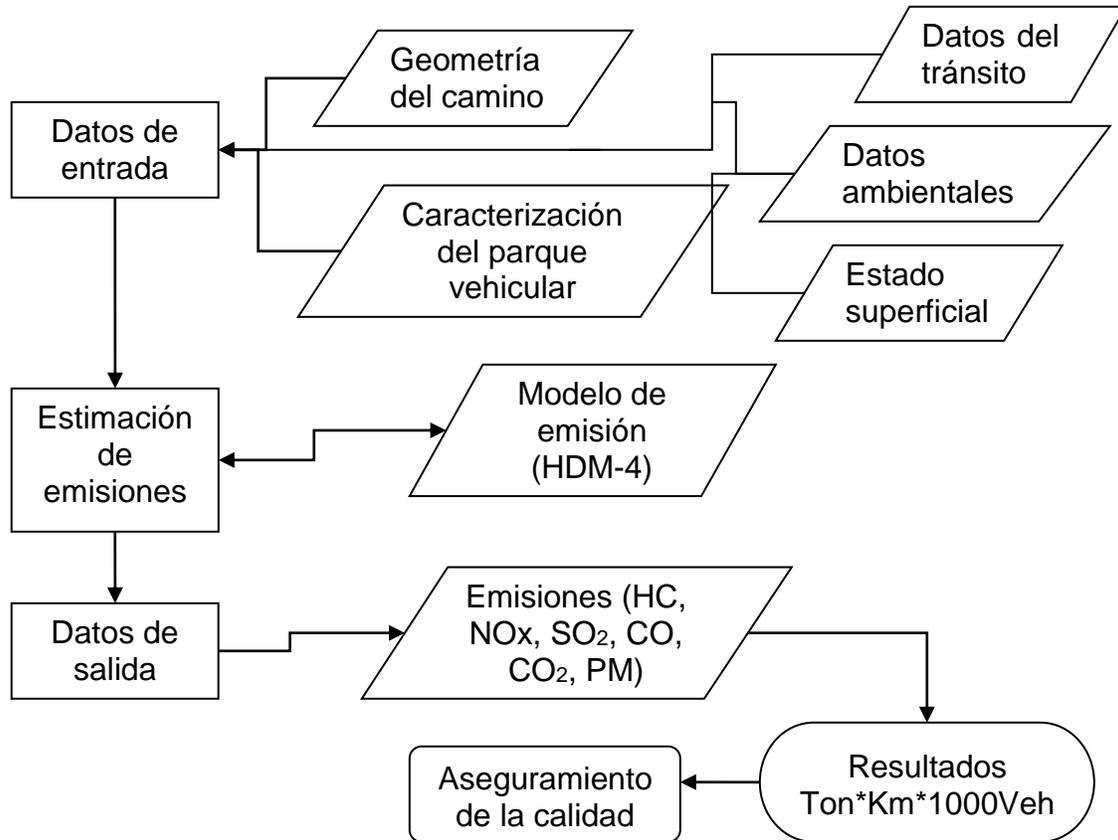


Figura 3.3 Metodología para el inventario de emisiones en carreteras

Fuente: Mendoza & Salazar, 2014.

Este modelo se basa en la obtención del consumo de combustible a través del modelo VOC (*Vehicle Operating Costs*).

Con este enfoque, la metodología utilizada para la estimación de emisiones en los libramientos se basó en el ahorro del consumo de combustible que tendrían los vehículos en función del tiempo general de viaje.

Para poder desarrollar una metodología adecuada era necesario contar con información de los proyectos de libramientos que se hayan construido en el presente periodo gubernamental, por lo que la participación de la Subsecretaría de Infraestructura, quien proveyó los datos básicos de cada proyecto carretero, fue necesaria.

La metodología que se muestra en la figura 3.4 representa una versión simplificada de un enfoque de abajo hacia arriba, dado que se pudo estimar y obtener datos básicos que representan la actividad.

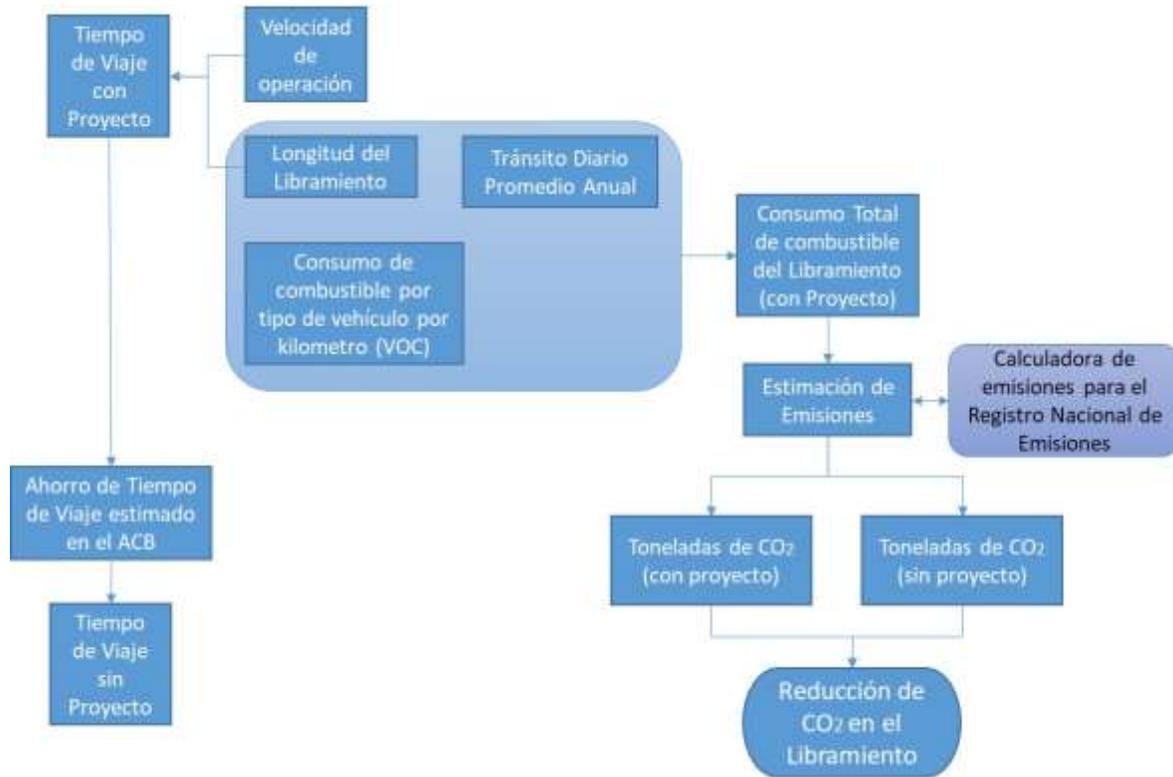


Figura 3.4 Metodología para estimar la reducción de CO₂ por la construcción de libramientos carreteros

Fuente: Elaboración propia

Con base en el esquema de la figura 3.4 se detallarán en los puntos siguientes las características de cada elemento integrado en la metodología.

3.1 Ficha técnica de los proyectos

Con el apoyo de la Subsecretaría de Infraestructura (SSI) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, se obtuvo información de 29 proyectos de libramientos carreteros, de los cuales únicamente 14 cubrieron el total de requerimientos de información.

Los datos que integran la ficha técnica de interés para el análisis son:

- Nombre del proyecto, conforme al programa de infraestructura.

- Velocidad de proyecto, conforme a la especificación de diseño del proyecto geométrico de la carretera.
- Longitud del libramiento.
- Ahorro del tiempo de viaje, el cual se estimó conforme al proyecto y se utilizó en el Análisis Costo-Beneficio.

Un ejemplo de ficha técnica se muestra a continuación:

Tabla 3.1 Ficha técnica del Libramiento de la Laguna (Libramiento Norte de Torreón)

Nombre:	Libramiento de la Laguna (Libramiento Norte de Torreón)	
Clave	S/C	
Ruta:	MEX-040D	
Descripción:	<ul style="list-style-type: none"> • El proyecto consiste en la construcción de un libramiento de altas especificaciones tipo A2 de 40.7 km de longitud, con 2 carriles de 3.5 metros, acotamientos de 2.5 metros y un ancho de corona de 12 metros. El libramiento inicia en el entronque "Matamoros" sobre la autopista Torreón-Salttilo y concluye en el entronque "El Vergel" sobre la carretera Gómez Palacio - Jiménez, librando el tramo urbano y semi-urbano de la Comarca Lagunera. Adicionalmente, se contempla la construcción de 2 entronques, uno en el Aeropuerto de Durango y otro para la incorporación de los flujos provenientes del municipio de Guadalupe Victoria, sobre la autopista Durango-Torreón. 	
Velocidad de Diseño:	90 km/h	
TDPA estimado:	3,000 Vehículos	
Tipo de Carpeta:	Asfáltica	
Longitud Total:	40.7 km	
Ahorro de Tiempo de Viaje:	60 min	
Tiempo de Viaje del Libramiento:	27.13 min	
Inversión Total:	\$ 2,400 mdp	
Población Beneficiada:	1,074,774 habitantes de los municipios de Gómez Palacio y Ciudad Lerdo en Durango y Torreón, San Pedro de las Colinas y Matamoros en Coahuila.	

Fuente: Elaboración propia con información de la SSI.

El resto de las fichas técnicas se incluyen en el anexo 1.

3.2 Tiempo de viaje con proyecto

El tiempo de viaje del libramiento se estimó mediante la fórmula física para determinar la velocidad:

$$Velocidad = \frac{Distancia}{Tiempo}$$

De dicha ecuación, despejamos en el tiempo y se obtiene:

$$Tiempo\ de\ Viaje = \frac{Longitud\ del\ Libramiento}{Velocidad\ de\ Diseño}$$

De esta manera se obtuvo el tiempo de viaje en los libramientos, mediante el cociente de la longitud del nuevo libramiento y su velocidad de diseño.

El sesgo en la metodología es suponer una velocidad constante en toda la carretera, la cual en la realidad es variable.

3.3 Tránsito Diario Promedio Anual

El Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) se obtuvo del aforo más reciente registrado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y publicado en Datos Viales.

Por ejemplo, para los datos viales del Libramiento de la Laguna (Libramiento Norte de Torreón) se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Datos viales del Libramiento de la Laguna (Libramiento Norte de Torreón)

ESTACIÓN					CLASIFICACIÓN VEHICULAR EN PORCIENTO								
Punto Generador	km.	TE	SC	TDPA	M	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	Otros
X. C. Gómez Palacio - Jiménez	0.000	3	0	1,719	0.9	53.3	2.7	6.4	2.9	18.0	5.0	8.2	2.6
X. C. La Cuchilla - Torreón	17.360	1	0	2,660	0.8	59.1	3.2	9.7	2.4	13.7	3.9	6.3	0.9
X. C. La Cuchilla - Torreón	17.360	1	0	1,314	1.0	42.4	2.7	4.9	4.3	23.4	4.8	14.2	2.3
X. C. Torreón - Saltillo	40.700	1	0	1,321	1.2	43.0	3.9	7.4	2.9	21.4	6.5	11.9	1.8
				Σ=	1.0	49.5	3.1	7.1	3.1	19.1	5.1	10.2	1.9

Fuente: Elaboración propia con información de la DGST.

La información de Datos Viales es recabada anualmente por la Dirección de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT, a través de estaciones de aforo en campo.

3.4 Consumo de combustible

El consumo de combustible se estimó mediante el uso de modelos de costo de operación del vehículo (VOC, por sus siglas en inglés). Los costos operativos de los vehículos son un componente importante del análisis de costo-beneficio y deben estimarse para toda la flota de vehículos y para diferentes condiciones de operación.

El modelo desarrollado por el Banco Mundial fue adaptado a las condiciones mexicanas de acuerdo a las características técnicas de los vehículos que operan en las carreteras del país. Dicha versión la llevó a cabo el Instituto Mexicano del Transporte y se denominó VOCMEX.

Con la utilización del VOCMEX, Arroyo et. al. (2016), investigadores del Instituto Mexicano del Transporte actualizan anualmente los costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano.

De esta manera para cada vehículo, de acuerdo con la clasificación de SCT, se estima su costo de operación vehicular y un factor importante es el consumo de combustible de la unidad por kilómetro.

A manera de ejemplo se muestra a continuación la información calculada para el camión articulado (T3-S3).

Camión articulado (T3-S3)

Tractocamión de tres ejes INTERNATIONAL 9200i con MOTOR CUMMINS ISX de 450 HP
Semirremolque de tres ejes, tipo caja de aluminio de 40 pies
Llantas 1100-20.00 normal
Consumos, por cada 1,000 veh-km

Consumo de combustible	litros	579.47
Uso de lubricantes	litros	5.45
Consumo de llantas	núm llantas nuevas equivalentes	0.39
Tiempo de operador	horas	12.21
Mano de obra de mantenimiento	horas	30.48
Refacciones	% precio vehículo nuevo	0.27
Depreciación	% precio vehículo nuevo	0.06
Intereses (tasa 1.53%)	% precio vehículo nuevo	0.00

Figura 3.5 Costos de operación vehicular (Ejemplo)

Fuente: Arroyo et. al. (2016)

Cada tipo de vehículo tiene consumos diferentes, por ello se tomaron los consumos de combustible para cada uno de ellos, los cuales se muestran en el anexo 2 de esta publicación.

3.5 Consumo total de combustible

El consumo total de combustible involucra el consumo de combustible por vehículo, la longitud del libramiento y el TDPA de acuerdo con el tipo de vehículo. Dicho cálculo se expresa en la ecuación siguiente:

$$CTC = C_{veh-km} * L * TDPA_{TipoVeh}$$

Donde:

CTC= Consumo Total de Combustible

C_{veh-km}= Consumo por tipo de vehículo por kilómetro

L = Longitud del Libramiento

TDPA_{TipoVeh}= Número de vehículos por categoría que circulan en el Libramiento

Con base en este cálculo se obtuvieron los consumos de combustible total de cada libramiento carretero.

3.6 Estimación de emisiones

La estimación de emisiones está basada en el consumo total de combustibles, mediante el cual se puede determinar a través de factores la cantidad de gases de efecto invernadero.

El Registro Nacional de Emisiones (RENE) de SEMARNAT cuenta con una calculadora mediante el cual cada sector y actividad, en función de su consumo de combustible, pueden determinar su contribución a la generación de GEI o de CO₂ equivalente y con ello los diferentes sectores productivos del país pueden dar trazabilidad, evaluar tendencias y establecer estrategias nacionales de reducción de emisiones.

El RENE para el sector transporte puede estimar las emisiones del subsector carretero o terrestre.

Para determinar la emisión directa de CO₂ equivalente derivada del consumo y oxidación de combustibles en motores de combustión interna, se deberá aplicar la

siguiente metodología de cálculo por factores de emisión para cada uno de los combustibles empleados en la actividad, de acuerdo con lo establecido por el Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de CyGEI (RENE, 2016).

Para ello será necesario calcular la cantidad que se genera de cada gas por medio de las siguientes formulas:

$$ECO_2=VC \times PC \times FECO_2$$

$$ECH_4=VC \times PC \times FECH_4$$

$$EN_2O=VC \times PC \times FEN_2O$$

Dónde:

ECO₂: Emisiones de bióxido de carbono en toneladas [t]

ECH₄: Emisiones de metano en kilogramos [kg]

EN₂O: Emisiones de óxido nitroso en kilogramos [kg]

VC: Consumo de combustible al año en litros [l] o metros cúbicos [m³]

PC: Poder calorífico de cada combustible [MJ/l o MJ/m³]

FE: Factor de emisión de cada gas [t/MJ o Kg/MJ]

Para llevar a cabo la aplicación de esta fórmula es necesario compilar, previamente, la cantidad de combustibles empleados en las fuentes móviles (RENE, 2016).

Los valores del poder calorífico (PC) para cada combustible y los factores de emisión (FE) son los que se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Valores de PC y FE

CO ₂		
Combustible	Poder Calorífico (MJ/l)	Factor de emisión t/MJ
Gasolina	32.216	0.0000693
Diésel	35.5374	0.0000741
Gas Natural	36.569	0.0000561
CO ₂		
Combustible	Poder Calorífico (MJ/l)	Factor de emisión t/MJ
Gasolina	32.216	0.0000250
Diésel	35.5374	0.0000039
Gas Natural	36.569	0.0000920
CO ₂		
Combustible	Poder Calorífico (MJ/l)	Factor de emisión t/MJ
Gasolina	32.216	0.0000080
Diésel	35.5374	0.0000039
Gas Natural	36.569	0.0000030

Fuente: Elaboración propia con información del RENE, 2016.

Una vez calculadas las equivalencias de cada gas, éstos se deben transformar en bióxido de carbono equivalente (CO₂e), por lo que se emplearán las siguientes fórmulas:

$$ECO_{2e}(CO_2)=ECO_2$$

$$ECO_{2e}(CH_4)=E(CH_4) \times PCG_{CH_4}$$

$$ECO_{2e}(N_2O)=E(N_2O) \times PCG_{N_2O}$$

Dónde:

PCG: Es el Potencial de Calentamiento Global de cada gas.

ECO_{2e}: Emisiones de bióxido de carbono equivalente de cada gas en toneladas (CH₄, N₂O) [t]

Para ello se requiere evaluar el potencial de calentamiento para los diferentes gases. La tabla 3.4 muestra algunos ejemplos de potencial de calentamiento.

Tabla 3.4 Potencial de Calentamiento Global (PCG) de algunos gases

Gas o Compuesto	PCG a 100 años
Bióxido de carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	28
Óxido nitroso (N ₂ O)	265

Fuente: Elaboración propia con información del RENE, 2016.

Finalmente, las emisiones totales de CO₂ equivalente serán la suma de todas las emisiones una vez que se han multiplicado por sus equivalencias.

3.7 Reducción de CO₂ por la construcción de libramientos carreteros

La estimación de emisiones se realiza para ambos casos, con proyecto y sin proyecto.

La estimación de emisiones con proyecto se realiza directamente con el consumo de combustible de todos los vehículos que circulan en el libramiento.

Para la estimación de emisiones sin proyecto se consideró el tiempo de viaje del libramiento más el ahorro de tiempo, de tal manera que se obtuviera el CO₂ equivalente.

La reducción de CO₂ equivalente será entonces la diferencia del total de emisiones con o sin proyecto.

$$\begin{aligned} & \textit{Reducción de Emisiones CO}_2\textit{e} \\ & = \textit{Emisiones total sin proyecto} - \textit{Emisiones totales con proyecto} \end{aligned}$$

Como el resultado proviene de un tránsito diario, las estimaciones son diarias, sin embargo, se proyectarán acumuladas las de los 365 días del año.

En el capítulo siguiente se mostrarán los resultados de la experimentación.

4 Reducción de CO₂ por la construcción de libramientos carreteros

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos con la metodología descrita en el capítulo 3.

Los libramientos se construyeron con diversas especificaciones de proyectos, clasificados como A2 y A4, lo cual significa que son carreteras de un cuerpo con dos carriles y ambos sentidos de circulación, y una carretera con uno o dos cuerpos, pero con cuatro carriles, dos para cada sentido de circulación.

Los resultados se mostrarán por libramiento, para las carreteras A4 aparecerá un cálculo por sentido, mientras que para las A2 solamente un cálculo.

La reducción de CO₂ equivalente se muestra en toneladas diarias con base al TDPA de la carretera. El año de aforo puede variar; sin embargo, para cada caso se tomó el más reciente.

4.1 Periférico Pablo García y Montilla (Libramiento de Campeche)

Los resultados de la estimación de la reducción del Periférico Pablo García y Montilla, localizado en la Ciudad de Campeche se presentan a continuación.

Para el sentido de circulación 1 la tabla 4.1 muestra los resultados.

Tabla 4.1 Estimación de la reducción de CO₂ eq Periférico Pablo García y Montilla (Libramiento de Campeche) – Sentido 1

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	2205	78	243	61	139	44	103	2,873
Consumo de combustible (Its)	9,865.35	808.42	2,075.15	708.61	1,748.89	662.91	2,037.66	17,907
CO ₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	22.97	2.15	5.52	1.89	4.6	1.76	5.42	44.31
CO ₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	49.47	4.63	11.89	4.07	9.91	3.79	11.67	95.44
Reducción CO ₂ eq (Ton-Diarias)	26.50	2.48	6.37	2.18	5.31	2.03	6.25	51.13

Para el sentido de circulación 2 la tabla 4.2 muestra los resultados.

Tabla 4.2 Estimación de la reducción de CO₂ eq Periférico Pablo García y Montilla (Libramiento de Campeche) – Sentido 2

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	2435	96	302	76	165	54	124	3,252
Consumo de combustible (lts)	10,894.38	994.98	2,578.99	882.86	2,076.02	813.58	2,453.11	20,693.91
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	25.37	2.65	6.86	2.35	5.52	2.17	6.52	51.44
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	54.64	5.71	14.78	5.06	11.89	4.67	14.04	110.79
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	29.27	3.06	7.92	2.71	6.37	2.50	7.52	59.35

4.2 Libramiento Sur de Tuxtla Gutiérrez

Los resultados de la estimación de la reducción del Libramiento Sur, localizado en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez se presentan a continuación.

Para el sentido de circulación 1 la tabla 4.3 muestra los resultados.

Tabla 4.3 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento Sur de Tuxtla Gutiérrez – Sentido 1

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	12214	34	459	48	219	288	48	13,310
Consumo de combustible (lts)	19,336.42	124.69	1,386.98	197.30	975.00	1,535.36	336.01	23,891.8
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	45.03	0.33	3.69	0.52	2.59	4.08	0.89	57.13
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	118.45	0.87	9.71	1.37	6.81	10.73	2.34	150.28
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	73.42	0.54	6.02	0.85	4.22	6.65	1.45	93.15

Para el sentido de circulación 2 la tabla 4.4 muestra los resultados.

Tabla 4.4 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento Sur de Tuxtla Gutiérrez – Sentido 2

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	13,511	38	560	54	268	353	54	14,838
Consumo de combustible (lts)	21,389.75	139.36	1,692.17	221.97	1,193.15	1,881.89	378.01	26,896.3
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	49.81	0.32	4.5	0.59	3.17	5.01	1.01	64.41
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	131.02196	0.84174	11.83696	1.55196	8.338478	13.17848	2.65674	169.43
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	81.211957	0.52174	7.336957	0.96196	5.168478	8.168478	1.64674	105.02

4.3 Libramiento Oriente de Durango

Los resultados de la estimación de la reducción del Libramiento Oriente, localizado en la Ciudad de Durango se presentan a continuación.

Para el sentido de circulación 1 la tabla 4.5 muestra los resultados.

Tabla 4.5 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento Oriente de Durango – Sentido 1

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	1716	41	186	42	78	32	52	2,147
Consumo de combustible (lts)	3,100.54	171.61	641.46	197.03	396.33	194.70	415.45	5,117
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	7.21	0.46	1.71	0.53	1.06	0.52	1.11	12.60
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	27.81	1.77	6.60	2.04	4.09	2.01	4.28	48.60
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	20.60	1.31	4.89	1.51	3.03	1.49	3.17	36.00

Para el sentido de circulación 2 la tabla 4.6 muestra los resultados.

Tabla 4.6 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento Oriente de Durango – Sentido 2

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	1357	37	161	38	66	27	41	1,727
Consumo de combustible (Its)	2,451.88	154.87	555.24	178.27	335.36	164.28	327.56	4,167
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	5.71	0.41	1.48	0.47	0.89	0.44	0.87	10.27
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	22.02	1.58	5.71	1.81	3.43	1.70	3.36	39.61
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	16.31	1.17	4.23	1.34	2.54	1.26	2.49	29.34

4.4 Libramiento de Tepic

Los resultados de la estimación de la reducción del Libramiento de Tepic, localizado en la Ciudad de Tepic, Nayarit, se presentan a continuación.

Para el sentido de circulación 1 la tabla 4.7 muestra los resultados.

Tabla 4.7 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento de Tepic – Sentido 1

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	20951	554	947	627	800	172	209	24,260
Consumo de combustible (Its)	64,894.47	3,975.14	5,598.76	5,042.47	6,968.45	1,794.04	2,862.47	91,136
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	150.78	10.57	14.89	13.41	18.63	4.8	7.65	22.73
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	402.08	28.19	39.71	35.76	49.68	12.80	20.40	588.61
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	251.30	17.62	24.82	22.35	31.05	8.00	12.75	367.88

Para el sentido de circulación 2 la tabla 4.8 muestra los resultados.

Tabla 4.8 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento de Tepic – Sentido 2

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	20529	623	916	623	929	183	220	24,023
Consumo de combustible (Its)	63,587.35	4,470.24	5,415.48	5,010.30	8,092.11	1,908.77	3,013.12	91,497
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	148.09	11.89	14.4	13.33	21.52	5.08	8.01	222.32
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	394.91	31.71	38.40	35.55	57.39	13.55	21.36	592.85
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	246.82	19.82	24.00	22.22	35.87	8.47	13.35	370.53

4.5 Libramiento de Mazatlán

Los resultados de la estimación de la reducción del Libramiento de Mazatlán, localizado en la Ciudad de Mazatlán, Sinaloa, se presentan a continuación.

Para el sentido de circulación 1 la tabla 4.9 muestra los resultados.

Tabla 4.9 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento de Mazatlán – Sentido 1

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	20404	366	1649	471	707	288	288	24,173
Consumo de combustible (Its)	18,960.05	787.85	2,924.72	1,136.37	1,847.51	901.19	1,183.34	27,741
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	44.16	2.1	7.78	3.02	4.92	2.4	3.15	67.53
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	289.49	13.77	51.00	19.80	32.25	15.73	20.65	442.70
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	245.33	11.67	43.22	16.78	27.33	13.33	17.50	375.17

Para el sentido de circulación 2 la tabla 4.10 muestra los resultados.

Tabla 4.10 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento de Mazatlán – Sentido 2

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	20810	432	1414	445	707	262	236	24,306
Consumo de combustible (Its)	19,337.32	929.92	2,507.91	1,073.64	1,847.51	819.83	969.68	27,486
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	45.03	2.47	6.67	2.86	4.92	2.18	2.58	66.71
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	295.20	16.19	43.73	18.75	32.25	14.29	16.91	437.32
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	250.17	13.72	37.06	15.89	27.33	12.11	14.33	370.61

4.6 Libramiento de Reynosa

Los resultados de la estimación de la reducción del Libramiento de Reynosa, localizado en la Ciudad de Reynosa, Tamaulipas, se presentan a continuación.

Para el sentido de circulación 1 la tabla 4.11 muestra los resultados.

Tabla 4.11 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento de Reynosa – Sentido 1

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	26316	290	1832	290	794	473	168	30,163
Consumo de combustible (Its)	45,284.57	1,156.03	6,017.20	1,295.69	3,842.32	2,740.89	1,278.30	61,615
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	105.46	3.07	16	3.46	10.22	7.29	3.4	148.90
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	374.38	10.90	56.80	12.28	36.28	25.88	12.07	528.60
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	268.92	7.83	40.80	8.82	26.06	18.59	8.67	379.70

Para el sentido de circulación 2 la tabla 4.12 muestra los resultados.

Tabla 4.12 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento de Reynosa – Sentido 2

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	25873	321	2015	321	870	534	183	30,117
Consumo de combustible (Its)	44,522.26	1,279.60	6,618.27	1,434.20	4,210.10	3,094.37	1,392.43	62,551
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	103.69	3.4	17.6	3.81	11.2	8.23	3.7	151.63
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	368.10	12.07	62.48	13.53	39.76	29.22	13.14	538.29
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	264.41	8.67	44.88	9.72	28.56	20.99	9.44	386.66

4.7 Libramiento de la Laguna (Libramiento Norte de Torreón)

Los resultados de la estimación de la reducción del Libramiento de la Laguna, localizado en la Ciudad de Torreón, Coahuila, se muestran en la tabla 4.13.

Tabla 4.13 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento de la Laguna

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	962	61	138	61	372	98	198	1,890
Consumo de combustible (Its)	6,737.52	989.68	1,844.77	1,109.25	7,326.74	2,311.27	6,131.71	26,450.9
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	15.69	2.63	4.91	2.95	19.49	6.15	16.31	68.13
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	50.39	8.45	15.77	9.47	62.59	19.75	52.38	218.79
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	34.70	5.82	10.86	6.52	43.10	13.60	36.07	150.66

4.8 Libramiento San Buenaventura - Hermanas

Los resultados de la estimación de la reducción del Libramiento San Buenaventura - Hermanas, localizado en la Ciudad de Monclova, Coahuila, se muestran en la tabla 4.14.

Tabla 4.14 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento San Buenaventura - Hermanas

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	580	7	104	18	13	4	1	727
Consumo de combustible (Its)	4,990.32	139.52	1,707.94	402.11	314.55	115.89	38.04	7,708
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	11.59	0.37	4.57	1.08	0.84	0.31	0.1	18.86
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	18.54	0.59	7.31	1.73	1.34	0.50	0.16	30.18
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	6.95	0.22	2.74	0.65	0.50	0.19	0.06	11.32

4.9 Libramiento Poniente Arco Sur de Tecomán

Los resultados de la estimación de la reducción del Libramiento Poniente Arco Sur de Tecomán, localizado en la Ciudad de Tecomán, Colima, se muestran en la tabla 4.15.

Tabla 4.15 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento Poniente Arco Sur de Tecomán

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	971	21	129	44	36	26	3	1,230
Consumo de combustible (Its)	1,866.39	93.51	473.27	219.59	194.59	168.29	25.50	3,041
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	4.34	0.25	1.27	0.59	0.52	0.45	0.07	7.49
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	21.82	1.26	6.39	2.97	2.61	2.26	0.35	37.66
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	17.48	1.01	5.12	2.38	2.09	1.81	0.28	30.17

4.10 Libramiento Suroeste de Durango

Los resultados de la estimación de la reducción del Libramiento Suroeste de Durango, localizado en la Ciudad de Durango, Durango, se muestran en la tabla 4.16.

Tabla 4.16 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento Suroeste de Durango

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	1042	84	485	51	43	16	12	1,733
Consumo de combustible (Its)	3,496.49	652.96	3,106.32	444.33	405.77	180.79	178.05	8,465
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	8.13	1.75	8.31	1.19	1.09	0.48	0.48	21.43
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	20.46	4.40	20.91	2.99	2.74	1.21	1.21	53.92
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	12.33	2.65	12.60	1.80	1.65	0.73	0.73	32.49

4.11 Anillo Periférico Oriente de la Piedad

Los resultados de la estimación de la reducción del Libramiento Oriente de la Piedad, localizado en la Ciudad de La Piedad, Michoacán, se muestran en la tabla 4.17.

Tabla 4.17 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento Oriente de la Piedad

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	86	11	13	12	36	8	14	180
Consumo de combustible (Its)	1,431.05	424.02	412.89	518.46	1,684.62	448.28	1,030.09	5,949
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	3.32	1.13	1.1	1.39	4.5	1.2	2.75	15.39
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	8.25	2.81	2.73	3.45	11.18	2.98	6.83	38.25
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	4.93	1.68	1.63	2.06	6.68	1.78	4.08	22.86

4.12 Libramiento de Cd. Valles - Tamuín, Tramo: Tamuín - Tampico

Los resultados de la estimación de la reducción del Libramiento Cd. Valles - Tamuín, Tramo: Tamuín - Tampico, localizado en la Ciudad Valles, San Luis Potosí, se muestran en la tabla 4.18.

Tabla 4.18 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento Cd. Valles - Tamuín, Tramo: Tamuín - Tampico

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	3865	190	564	202	374	178	160	5,533
Consumo de combustible (Its)	52,542.05	5,983.44	14,634.42	7,129.87	14,297.90	8,148.51	9,617.65	112,354
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	122.36	15.91	38.92	18.96	38.03	21.67	25.58	281.43
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	180.44	23.46	57.39	27.96	56.08	31.96	37.72	415.02
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	58.08	7.55	18.47	9.00	18.05	10.29	12.14	133.59

4.13 Libramiento de Villa de Reyes

Los resultados de la estimación de la reducción del Libramiento de Villa de Reyes, localizado en Villa de Reyes, San Luis Potosí, se muestran en la tabla 4.19.

Tabla 4.19 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento de Villa de Reyes

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	3541	204	760	278	1316	197	197	6,493
Consumo de combustible (Its)	2,802.94	374.07	1,148.26	571.36	2,929.46	525.12	689.52	9,041
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	6.53	0.99	3.05	1.52	7.79	1.4	1.84	23.12
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	49.12	7.45	22.94	11.43	58.59	10.53	13.84	173.9
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	42.59	6.46	19.89	9.91	50.80	9.13	12.0	150.78

4.14 Libramiento Norponiente de San Luis Potosí (Cuota)

Los resultados de la estimación de la reducción del Libramiento Norponiente de San Luis Potosí, localizado en la Ciudad de San Luis Potosí, San Luis Potosí, se muestran en la tabla 4.20.

Tabla 4.20 Estimación de la reducción de CO₂ eq Libramiento Norponiente de San Luis Potosí

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TOTAL
TDPA	499	67	105	150	560	110	278	1,769
Consumo de combustible (lts)	2,679.08	833.30	1,076.00	2,090.98	8,455.05	1,988.74	6,599.66	23,723
CO₂ eq CON proyecto (Ton-Diarias)	6.24	2.22	2.86	5.56	22.49	5.29	17.55	62.21
CO₂ eq SIN proyecto (Ton-Diarias)	19.74	7.02	9.05	17.59	71.15	16.73	55.52	196.80
Reducción CO₂ eq (Ton-Diarias)	13.50	4.80	6.19	12.03	48.66	11.44	37.97	134.59

4.15 Resumen del análisis de reducción de CO₂ eq

Con los resultados de los 14 Libramientos analizados se construyó la tabla resumen 4.21. En ésta se muestran datos como la longitud del libramiento, el ahorro en tiempo de viaje, así como la reducción de CO₂ equivalentes diarias y la estimación anual.

Tabla 4.21 Resumen de la reducción de CO₂ eq por Libramiento

Libramiento	Estado	Distancia (Km)	Ahorro del Tiempo de Viaje (min)	Reducción de CO ₂ eq (Ton-Diarias)	Reducción de CO ₂ eq (Kilotón-Anuales)	Reducción de CO ₂ eq (Kilotón-Anuales-Kilómetro)
Periférico Pablo García y Montilla	Campeche	26.3	20	110.48	40.325	1.533
Libramiento Sur de Tuxtla Gutiérrez	Chiapas	9.2	10	198.16	72.329	7.862
Libramiento de la Laguna (Libramiento Norte de Torreón)	Coahuila	40.7	60	150.66	54.989	1.351
Libramiento San Buenaventura – Estación Hermanas	Coahuila	41.1	20	11.32	4.130	0.100
Libramiento Poniente Arco Sur de Tecmán	Colima	11.17	30	30.17	11.013	0.986
Libramiento Suroeste de Durango	Durango	19.1	28	32.49	11.860	0.620
Libramiento Oriente de Durango	Durango	10.50	20	65.34	23.850	2.271
Anillo Periférico Oriente de la Piedad	Michoacán	20.2	20	22.86	8.342	0.413
Libramiento de Tepic	Nayarit	18	20	738.42	269.522	14.973
Libramiento de Cd. Valles y Tamuín – tramo Tamuín - Tampico	San Luis Potosí	49.4	25	133.59	48.760	0.987
Libramiento de Villa de Reyes	San Luis Potosí	4.6	20	150.78	55.035	11.964
Libramiento Norponiente de San Luis	San Luis Potosí	31.2	45	134.59	49.124	1.574
Libramiento de Mazatlán	Sinaloa	10.8	20	745.78	272.208	25.204
Libramiento de Reynosa	Tamaulipas	20	17	766.35	279.718	13.986

Con la información de resumen de la tabla 4.21, en la última columna se estimó la reducción de emisiones de dióxido de carbono por kilómetro al año, de tal manera que permita construir un indicador; sin embargo, debido a que cada proyecto tiene diferente número de carriles, se definió separar dicha tabla resumen para las carreteras A2 y A4.

4.16 Reducción de CO₂ eq de Libramientos A2

Para los libramientos de 2 carriles, uno sentido de circulación por carril, se estimó la reducción de emisiones de tal manera que se pudiera tener un factor promedio de la reducción anual de emisiones por kilómetro.

Tabla 4.22 Resumen de la reducción de CO₂ eq para Libramientos tipo A2

Libramientos A2	Estado	Distancia (Km)	Ahorro del Tiempo de Viaje (min)	Reducción de CO ₂ eq (Ton-Diarias)	Reducción de CO ₂ eq (Kilotón-Anuales)	Reducción de CO ₂ eq (Kilotón-Anuales-Kilómetro)
Libramiento de la Laguna (Libramiento Norte de Torreón)	Coahuila	40.7	60	150.66	54.989	1.351
Libramiento San Buenaventura – Estación Hermanas	Coahuila	41.1	20	11.32	4.130	0.100
Libramiento Poniente Arco Sur de Tecomán	Colima	11.17	30	30.17	11.013	0.986
Libramiento Suroeste de Durango	Durango	19.1	28	32.49	11.860	0.620
Anillo Periférico Oriente de la Piedad	Michoacán	20.2	20	22.86	8.342	0.413
Libramiento de Cd. Valles y Tamuín – tramo Tamuín - Tampico	San Luis Potosí	49.4	25	133.59	48.760	0.987
Libramiento de Villa de Reyes	San Luis Potosí	4.6	20	150.78	55.035	11.964
Libramiento Norponiente de San Luis	San Luis Potosí	31.2	45	134.59	49.124	1.574

Realizando el promedio de la reducción de emisiones de CO₂ eq, se obtuvo que para las carreteras tipo A2 por cada kilómetro de carretera que se construya se estarían reduciendo 2.25 Kilo-toneladas al año.

4.17 Reducción de CO₂ eq de Libramientos A4

Para los libramientos de 4 carriles, con dos carriles de circulación por sentido, se estimó la reducción de emisiones, de tal manera que se pudiera tener un factor promedio de la reducción anual de emisiones por kilómetro.

Tabla 4.23 Resumen de la reducción de CO₂ eq para Libramientos tipo A4

Libramiento	Estado	Distancia (Km)	Ahorro del Tiempo de Viaje (min)	Reducción de CO ₂ eq (Ton-Diarias)	Reducción de CO ₂ eq (Kilotón-Anuales)	Reducción de CO ₂ eq (Kilotón-Anuales-Kilómetro)
Periférico Pablo García y Montilla	Campeche	26.3	20	110.48	40.325	1.533
Libramiento Sur de Tuxtla Gutiérrez	Chiapas	9.2	10	198.16	72.329	7.862
Libramiento Oriente de Durango	Durango	10.50	20	65.34	23.850	2.271
Libramiento de Tepic	Nayarit	18	20	738.42	269.522	14.973
Libramiento de Mazatlán	Sinaloa	10.8	20	745.78	272.208	25.204
Libramiento de Reynosa	Tamaulipas	20	17	766.35	279.718	13.986

Realizando el promedio de la reducción de emisiones de CO₂ eq, se obtuvo que para las carreteras tipo A4 por cada kilómetro de carretera que se construya se estarían reduciendo 10.97 Kilo-toneladas al año.

4.18 Discusión y utilización de los resultados

Uno de los primeros hallazgos evidentes es que los libramientos que fueron proyectados como A4 debido al TDPA contribuyen a un mayor impacto en las emisiones, pero construirlos con un enfoque de reducción de emisiones significa una gran aportación del sector transporte por carretera.

La contribución a la reducción de emisiones de CO₂ eq de las carreteras A4 es cinco veces mayor que las carreteras A2, debido principalmente a su TDPA, en términos de kilo-toneladas anuales por kilómetro.

Para poder tener una comparativa más uniforme, en términos de la reducción de emisiones de CO₂ eq, se decidió cuantificar dicha reducción por carril-kilometro, a fin de visualizar de esta manera su comportamiento y con ello tener un indicador que permita a las autoridades basar sus proyecciones de reducción de emisiones en él y con ello completar las fichas técnicas de los proyectos de libramientos carreteros con datos más precisos para comunicar los beneficios ambientales de la construcción de Libramientos carreteros.

La tabla 4.24 muestra el resumen de la reducción de emisiones y su indicador “Reducción de CO₂ en kilo-toneladas anuales por carril-kilómetro.

Tabla 4.24 Resumen para obtener el indicador Reducción de CO₂ eq (Kilotón-Anuales por carril-kilómetro)

No.	Libramiento	Estado	TDPA	Distancia (Km)	Ahorro del Tiempo de Viaje (min)	Reducción de CO ₂ eq (Ton-Diarias)	Reducción de CO ₂ eq (Kilotón-Anual)	Reducción de CO ₂ eq (Kilotón-Anuales por carril-kilómetro)
1	Periférico Pablo García y Montilla (Sentido 1)	Campeche	3,038	26.3	20	51.13	18.661	0.354
2	Periférico Pablo García y Montilla (Sentido 2)	Campeche	3,423	26.3	20	59.35	21.664	0.411
3	Libramiento Sur de Tuxtla Gutiérrez (Sentido 1)	Chiapas	13,709	9.2	10	93.15	33.998	1.847
4	Libramiento Sur de Tuxtla Gutiérrez (Sentido 2)	Chiapas	15,336	9.2	10	105.02	38.330	2.083
5	Libramiento de la Laguna (Libramiento Norte de Torreón)	Coahuila	1,946	40.7	60	150.66	54.989	0.675
6	Libramiento San Buenaventura – Estación Hermanas	Coahuila	740	41.1	20	11.32	4.130	0.050
7	Libramiento Poniente Arco Sur de Tecmán	Colima	1,346	11.17	30	30.17	11.013	0.493
8	Libramiento Suroeste de Durango	Durango	1,767	19.1	28	32.49	11.860	0.310
9	Libramiento Oriente de Durango	Durango	2,291	10.50	20	36.00	13.140	0.625
10	Libramiento Oriente de Durango	Durango	1,831	10.50	20	39.61	14.458	0.688
11	Anillo Periférico Oriente de la Piedad	Michoacán	185	20.2	20	22.86	8.342	0.206
12	Libramiento de Tepic (Sentido 1)	Nayarit	24,605	18	20	367.88	134.277	3.729
13	Libramiento de Tepic (Sentido 2)	Nayarit	24,440	18	20	222.32	81.146	2.254
14	Libramiento de Cd. Valles y Tamuín – tramo Tamuín - Tampico	San Luis Potosí	5,933	49.4	25	133.59	48.760	0.493
15	Libramiento de Villa de Reyes	San Luis Potosí	6,784	4.6	20	150.78	55.035	5.982
16	Libramiento Norponiente de San Luis	San Luis Potosí	1,802	31.2	45	134.59	49.124	0.787
17	Libramiento de Mazatlán (Sentido 1)	Sinaloa	26,176	10.8	20	375.17	136.935	6.339
18	Libramiento de Mazatlán (Sentido 2)	Sinaloa	24,580	10.8	20	370.61	135.273	6.262
19	Libramiento de Reynosa (Sentido 1)	Tamaulipas	30,529	20	17	138.588	50.585	1.265
20	Libramiento de Reynosa (Sentido 2)	Tamaulipas	29,414	20	17	141.129	51.512	1.287

De esta manera, el promedio de la reducción de emisiones de GEI sería de 1.8 kilo-toneladas anuales por carril-kilómetro de CO₂ eq.

La figura 4.1 muestra los 20 tramos carreteros de análisis y la línea del promedio.

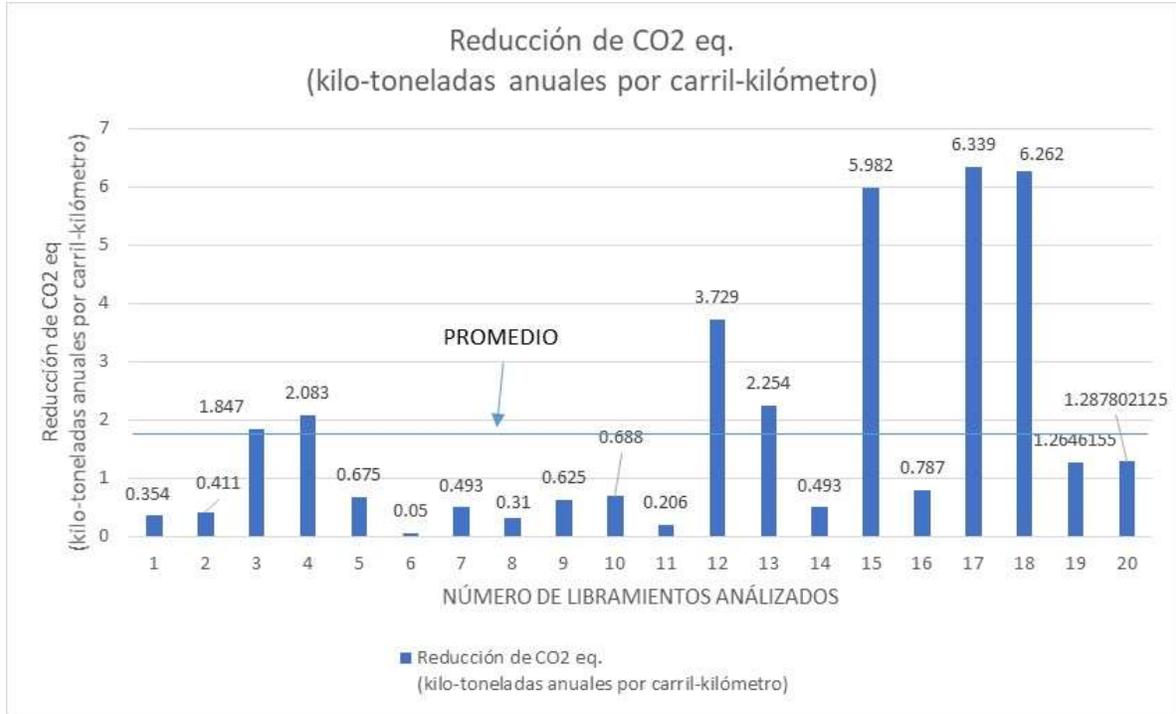


Figura 4.1 Reducción de CO₂ eq (kilo-toneladas anuales por carril-kilómetro)

Con el objetivo de que los futuros proyectos de libramientos carreteros cuenten con un insumo para estimar el potencial en la reducción de CO₂ eq se obtuvo el gráfico de la figura 4.2.

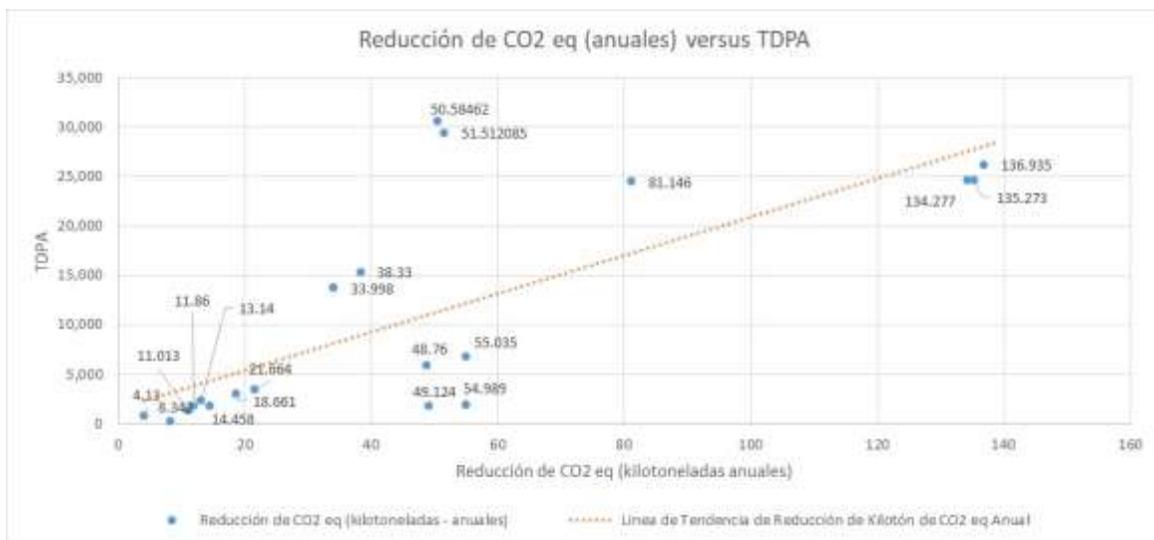


Figura 4.2 Reducción de CO₂ eq por libramiento versus TDPA

Para poder calcular los beneficios para cada proyecto, la figura 4.3 es un auxiliar importante, ya que, con el TDPA de proyecto, se pueden estimar los beneficios de reducción de CO₂ eq sin importar la longitud del proyecto carretero y el número de carriles, debido a que el dato estimado se encuentra en kilo-toneladas anuales por carril-kilometro que se pretenda construir.

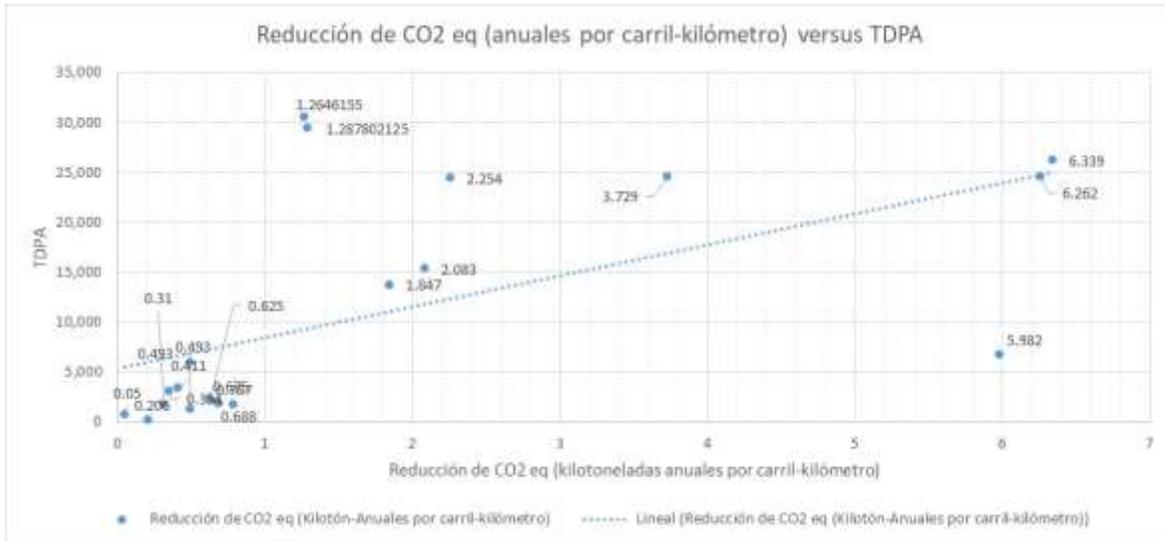


Figura 4.3 Reducción de CO₂ eq por carril-kilometro versus TDPA

Por ejemplo, un proyecto que se pretenda construir con un TDPA de 15,000 vehículo diarios tendría aproximadamente un potencial de ahorro de 3.0 kilo-toneladas anuales por carril-kilómetro de CO₂ eq, de tal manera que, si el Libramiento fuera un A2 con una longitud de 20 kilómetros, entonces será de 120 kilo-toneladas anuales de CO₂ eq.

Conclusiones

La construcción o modernización de Libramientos carreteros tiene sin duda un impacto significativo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

En la presente investigación se demuestra cuál ha sido el impacto de la construcción de libramientos carreteros en México, en términos de reducción de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq).

Los resultados mostraron que la reducción de emisiones va asociada directamente al tránsito diario promedio anual que circula en la carretera y a la geometría de la misma, de tal manera que las carreteras A4 tienen un mayor beneficio ambiental que una carretera A2.

Estas estimaciones han permitido obtener un indicador que refleja los beneficios que tendría la construcción de libramientos carreteros en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Los indicadores obtenidos podrán utilizarse de referencia para futuros proyectos de inversión en libramientos carreteros, mismos que permitirán, si se desea, utilizar la reducción de dióxido de carbono equivalente como parte de la evaluación económica de proyectos, a fin de justificar el beneficio de este tipo de infraestructura.

Derivado de este trabajo, un insumo importante para estimar las emisiones puede ser mediante la utilización de la gráfica de la figura 4.3 “Reducción de CO₂ eq por carril-kilometro versus TDPA”, donde con el TDPA del proyecto se pueden estimar los beneficios de reducción de dióxido de carbono equivalente, sin importar la longitud del proyecto carretero y el número de carriles, debido a que el resultado a calcular se encuentra en kilo-toneladas anuales por carril-kilometro que se pretenda construir.

Para los tomadores de decisiones, y para quienes realizan la planeación de proyectos en el sector transporte, contar con estos insumos como herramienta para determinar parte de los beneficios que conlleva la construcción de un libramiento carretero, es de vital importancia, sobre todo por el gran auge que los temas de cambio climático y de los proyectos de mitigación de gases de efecto invernadero han cobrado en el país.

Una clara justificación de los beneficios de reducción de dióxido de carbono equivalente en los proyectos de libramientos carreteros es, además, importante durante el proceso de evaluación del impacto ambiental que realiza la SEMARNAT, pues da soporte a la necesidad de construir este tipo de obras.

Aunque la construcción de libramientos también conlleva beneficios ambientales a las ciudades, tales como la disminución de ruido y la reducción de emisiones por el incremento de velocidad en red principal de las ciudades, debido a una disminución del congestionamiento, sin embargo, dichos impactos no fueron evaluados en esta investigación, pero podría ser la línea futura a seguir para los trabajos de investigación del área de medio ambiente.

De esta manera los trabajos futuros será continuar con la evaluación de las externalidades que el transporte tiene en el medioambiente.

Bibliografía

Anderson, S.J., R. Harrison, M.A. Euritt, H.S. Mahmassani, M.C. Walton, and R. Helaakoski. (1992). Economic Impacts of Highway Bypasses, Report 1247-3F. Center for Transportation Research, University of Texas, Austin, Texas.

Arroyo Osorno, José Antonio; Torres Vargas, Guillermo; González García, José Alejandro; Hernández García, Salvador. (2016). Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2016. Publicación Técnica No. 471. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

Asian Development Bank. (2010). Methodology for estimating carbon footprint of road projects. Case study: India. Manila, Philippines.

Blacksmith Institute. (2008). The World's Worst Pollution Problems. Zurich, Switzerland.

Boogaard, H.; Janssen, N.; Fischer, P.; Kos, G.; Weijers, E.; Cassee, F.; Van der Zee, S.; Hartog, J.; Meliefste, K.; Wang, M.; Brunekreef, B. and Hoek, G. (2012). Impact of low emission zones and local traffic policies on ambient air pollution concentrations', *Science of The Total Environment*, (435–436) 132–140.

California Department of Transportation. (2006). California Bypass Study. The Economic Impacts of Bypasses Volume 1: Planning Reference. Transportation Economics. California, USA. [CALTRANS, 2006].

Caminos y Puentes Federales. (2002). Normatividad para la operación de las plazas de cobro. Glosario y Terminología. Cuernavaca, México.

Centro de Estudios para la Preparación y Evaluación Socioeconómica de Proyectos. (1996). Evaluación social del proyecto de descongestión vehicular del boulevard Actopan, Hidalgo. Cd. de México, México.

Centro Queretano de Recursos Naturales. (2001). Planeación de los libramientos carreteros de la Ciudad de Querétaro. Querétaro, México.

European Commission. (2015). Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects. Economic appraisal tool for cohesion policy 2014-2020. Brussels, Belgium. [EC, 2015]

European Environment Agency. (2012). The contribution of transport to air quality. TERM 2012: transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe. Copenhagen, Denmark.

KÜRER, R. (1993). *Environment, Global and Local Effects*. ECMT.

Intergovernmental Panel on Climate Change. *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007*. Geneva, Switzerland (2007). [IPCC, 2007]

Mendoza Sánchez, Juan Fernando; Salazar Cortez, Armando. (2014). Inventario de emisiones en los principales corredores de transporte carretero en México. Publicación Técnica No. 400. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

Mendoza Sánchez, Juan Fernando; Trejo Trejo, Adrián. (2015). Construcción de la línea base de emisiones de CO₂ del transporte de carga en México. Publicación Técnica No. 425. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.

Midwest Transportation Center. (1995). *The economic impact of rural highway bypasses: Iowa and Minnesota Cases Studies*. Iowa State University. USA.

Parolin, Bruno. (2011). *Economic Evaluation of Town Bypasses: Review of literature*. University of New South Wales and Transport Roads and Maritime Services.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2012). *Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México, DF.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). *Estrategia Nacional de Cambio Climático*. Visión 10-20-40. México, DF.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). *Guía de Usuario del Registro Nacional de Emisiones (RENE) para el reporte de emisiones de compuestos y gases de efecto invernadero*. México, DF. [RENE, 2016]

SHAHEEN, Susan A. LIPMAN, Timothy E. (2007). *Reducing greenhouse emissions and fuel consumption: Sustainable Approaches for Surface Transportation*. International Association of Traffic and Safety Sciences. Published by Elsevier Ltd. Volume 31, Issue 1, 2007, Pages 6-20.

University of Kentucky. (2001). *The impact of new bypass route on the local economy and quality of life*. Kentucky Transportation Center. USA.

University of South Florida. (2011). *Impacts of bypass highway on small and medium sized cities in Florida: Enhancing existing evaluation methods*. Center for Urban Transportation Research. Tampa, USA.

World Health Organization. (2016). *Ambient Air Pollution: a global assessment of exposure and burden of disease*. Geneva, Switzerland.

Ligas consultadas:

Union of Concerned Scientists. <http://www.ucsusa.org/clean-vehicles/vehicles-air-pollution-and-human-health/diesel-engines> (UCS, 2002).

Enlaces de referencias:

http://wradio.com.mx/radio/2010/01/09/nacional/1263066540_935711.html
(recuperada el 20-dic-17)

Anexo 1. Fichas técnicas de los libramientos

Tabla A.1 Ficha técnica del Periférico Pablo García y Montilla (Libramiento de Campeche)

Nombre:	Periférico Pablo García y Montilla (Libramiento de Campeche)	
Clave	04573	
Ruta:	MEX-180	
Descripción:	<ul style="list-style-type: none"> Esta obra comprendió la construcción de dos cuerpos nuevos de 10.5 m de ancho de corona aprovechando el ya existente, consistente en una carretera tipo "A4S" (4 carriles con dos cuerpos separados), se construyeron entronques a nivel y pasos superiores vehiculares con sección a 4 carriles mediante trabajos de terracerías, obras de drenaje, estructuras, obras complementarias y señalamiento vertical y horizontal. El Libramiento de Campeche comprende del km 0+000 al km 26+263, la construcción de dos cuerpos nuevos separados aprovechando el ya existente, se dividió en 2 etapas: <ul style="list-style-type: none"> ✓ 1ª Etapa del Km 10+000 al Km 26+263 y 4 Entr. a Desnivel. ✓ 2ª Etapa del Km 0+000 al Km 10+000 y 3 Entr. a Desnivel. 	
Velocidad de Diseño:	90 km/h	
TDPA estimado:	8,000 Vehículos	
Tipo de Carpeta:	Concreto Asfáltico	
Longitud Total:	26.3 km	
Ahorro de Tiempo de Viaje:	60 min	
Tiempo de Viaje del Libramiento:	17.33 min	
Inversión Total:	\$ 2,400 mdp	
Población Beneficiada:	550,000 habitantes del municipio de Campeche	

Fuente: Elaboración propia con información de la SSI.

Tabla A.2 Ficha técnica del Libramiento Sur Tuxtla Gutiérrez (Modernizar)

Nombre:	Libramiento Sur Tuxtla Gutiérrez (Modernizar)	
Clave	07578	
Ruta:	CHIS	
Descripción:	<ul style="list-style-type: none"> Modernización mediante la reconstrucción de la superficie de rodamiento, obras de drenaje, demolición y retiro del pavimento existente para la formación de una base modificada con cemento portland, construcción de carpeta de concreto hidráulico, obras complementarias y señalamiento, en una longitud de 10.0 kilómetros, para alojar dos cuerpos de circulación, con origen en el entronque Ciro Farrera. 	
Velocidad de Diseño:	90 km/h	
TDPA estimado:	50,925 Vehículos	
Tipo de Carpeta:	Concreto Hidráulico	
Longitud Total:	9.2 km	
Ahorro de Tiempo de Viaje:	10 min	
Tiempo de Viaje del Libramiento:	6.1333 min	
Inversión Total:	\$ 490 mdp	
Población Beneficiada:	553,364 habitantes	

Fuente: Elaboración propia con información de la SSI.

Tabla A.3 Ficha técnica del Libramiento de la Laguna (Libramiento Norte de Torreón)

Nombre:	Libramiento de la Laguna (Libramiento Norte de Torreón)	
Clave	S/C	
Ruta:	MEX-040D	
Descripción:	<ul style="list-style-type: none"> El proyecto consiste en la construcción de un libramiento de altas especificaciones tipo A2 de 40.7 km de longitud, con 2 carriles de 3.5 metros, acotamientos de 2.5 metros y un ancho de corona de 12 metros. El libramiento inicia en el entronque "Matamoras" sobre la autopista Torreón-Salttillo y concluye en el entronque "El Vergel" sobre la carretera Gómez Palacio - Jiménez, librando el tramo urbano y semi-urbano de la Comarca Lagunera. Adicionalmente, se contempla la construcción de 2 entronques, uno en el Aeropuerto de Durango y otro para la incorporación de los flujos provenientes del municipio de Guadalupe Victoria, sobre la autopista Durango-Torreón. 	
Velocidad de Diseño:	90 km/h	
TDPA estimado:	3,000 Vehículos	
Tipo de Carpeta:	Asfáltica	
Longitud Total:	40.7 km	
Ahorro de Tiempo de Viaje:	60 min	
Tiempo de Viaje del Libramiento:	27.13 min	
Inversión Total:	\$ 2,400 mdp	
Población Beneficiada:	1,074,774 habitantes de los municipios de Gómez Palacio y Ciudad Lerdo en Durango y Torreón, San Pedro de las Colinas y Matamoros en Coahuila.	

Fuente: Elaboración propia con información de la SSI.

Tabla A.4 Ficha técnica del Libramiento San Buenaventura - Hermanas (Modernización)

Nombre:	Libramiento San Buenaventura - Hermanas (Modernización)	
Clave	5004	
Ruta:	COA-034	
Descripción:	<ul style="list-style-type: none"> El proyecto consiste en Modernizar de 7.0 m a 12.0 m de ancho de corona una longitud de 11.5 km, en el tramo Los Rodríguez – Estación Hermanas y en tramos restantes (29.6 km) solo se realizó conservación de pavimento con riego de sello, señalamiento vertical y horizontal. 	
Velocidad de Diseño:	90 km/h	
TDPA estimado:	4,000 Vehículos	
Tipo de Carpeta:	Asfáltica (A2)	
Longitud Total:	41.1 km	
Ahorro de Tiempo de Viaje:	20 min	
Tiempo de Viaje del Libramiento:	33.333 min	
Inversión Total:	\$ 107.4 mdp	
Población Beneficiada:	25,000 habitantes de Escobedo, Abasolo, Los Rodríguez y San Buenaventura.	

Fuente: Elaboración propia con información de la SSI.

Tabla A.5 Ficha técnica del Libramiento Poniente Arco Sur de Tecomán

Nombre:	Libramiento Poniente Arco Sur de Tecomán	
Clave	S/C	
Ruta:	COL	
Descripción:	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción del Libramiento Poniente Arco Sur de Tecomán, realizando los conceptos de terracerías, obra de drenaje, pavimentos, obras complementarias, alumbrado público y señalamiento vertical y horizontal. 	
Velocidad de Diseño:	90 km/h	 <p>Mapa de Tecomán que muestra el trayecto del Libramiento Poniente Arco Sur en azul, rodeando el centro de la ciudad. Se ven carreteras principales como la 200 y la 89.</p>
TDPA estimado:	3,144 Vehículos	
Tipo de Carpeta:	Asfáltica (A2)	
Longitud Total:	11.17 km	
Ahorro de Tiempo de Viaje:	30 min	
Tiempo de Viaje del Libramiento:	7.447 min	
Inversión Total:	190.30 mdp	
Población Beneficiada:	149,595 habitantes	

Fuente: Elaboración propia con información de la SSI.

Tabla A.6 Ficha técnica del Libramiento Suroeste de Durango

Nombre:	Libramiento Suroeste de Durango	
Clave	S/C	
Ruta:	MEX - 045	
Descripción:	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción de una sección transversal tipo A2 de 12 metros de ancho de corona, para alojar 2 carriles de circulación de 3.5 metros cada uno y acotamientos laterales de 2.5 metros. Además, se incluye la construcción de 3 entronque y 6 Estructuras (3 PIV, 2 PSV y 1 Puente). 	
Velocidad de Diseño:	90 km/h	
TDPA estimado:	3,654 Vehículos	
Tipo de Carpeta:	Asfáltica	
Longitud Total:	19.1 km	
Ahorro de Tiempo de Viaje:	28 min	
Tiempo de Viaje del Libramiento:	18.467 min	
Inversión Total:	754.5 mdp	
Población Beneficiada:	31,870 habitantes de Villa Unión, Vicente Guerrero.	

Fuente: Elaboración propia con información de la SSI.

Tabla A.7 Ficha técnica del Libramiento Oriente de Durango

Nombre:	Libramiento Oriente de Durango	
Clave	S/C	
Ruta:	MEX - 045	
Descripción:	•	
Velocidad de Diseño:	90 km/h	
TDPA estimado:	Vehículos	
Tipo de Carpeta:		
Longitud Total:	10.5 km	
Ahorro de Tiempo de Viaje:	20 min	
Tiempo de Viaje del Libramiento:	7 min	
Inversión Total:	mdp	
Población Beneficiada:		

Fuente: Elaboración propia con información de la SSI.

Tabla A.8 Ficha técnica del Anillo Periférico Oriente de la Piedad

Nombre:	Anillo Periférico Oriente de la Piedad	
Clave	S/C	
Ruta:	MEX-110D	
Descripción:	<ul style="list-style-type: none"> El proyecto consiste en la construcción de un tramo nuevo con una sección transversal tipo "A2" de 12 m de corona, para alojar 2 carriles de circulación de 3.5 m cada uno y acotamientos de 2.5 m, en 14.0 Km; incluyendo 3 entronques, Irapuato Km 0+000, Numarán Km 7+500 y Zamora Km 14+000, así como un puente "Río Lerma" Km 0+650 (Long. 93 m). 	
Velocidad de Diseño:	90 km/h	
TDPA estimado:	7,507 Vehículos	
Tipo de Carpeta:	Concreto Asfáltico	
Longitud Total:	14 km	
Ahorro de Tiempo de Viaje:	20 min	
Tiempo de Viaje del Libramiento:	13.4666 min	
Inversión Total:	\$ 552.1 mdp	
Población Beneficiada:	99,576 habitantes del municipio La Piedad	

Fuente: Elaboración propia con información de la SSI.

Tabla A.9 Ficha técnica del Libramiento de Tepic

Nombre:	Libramiento de Tepic	
Clave	18232	
Ruta:	MEX – 015	
Descripción:	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción de un libramiento carretero de 2 carriles de circulación, al norte de la ciudad de Tepic, para dar continuidad a la circulación del tránsito a lo largo del corredor México–Nogales con ramal a Tijuana. 	
Velocidad de Diseño:	90 km/h	
TDPA estimado:	4,878 Vehículos	
Tipo de Carpeta:	Asfáltica	
Longitud Total:	18 km	
Ahorro de Tiempo de Viaje:	20 min	
Tiempo de Viaje del Libramiento:	12 min	
Inversión Total:	\$ 2,222 mdp	
Población Beneficiada:	413,608 habitantes	

Fuente: Elaboración propia con información de la SSI.

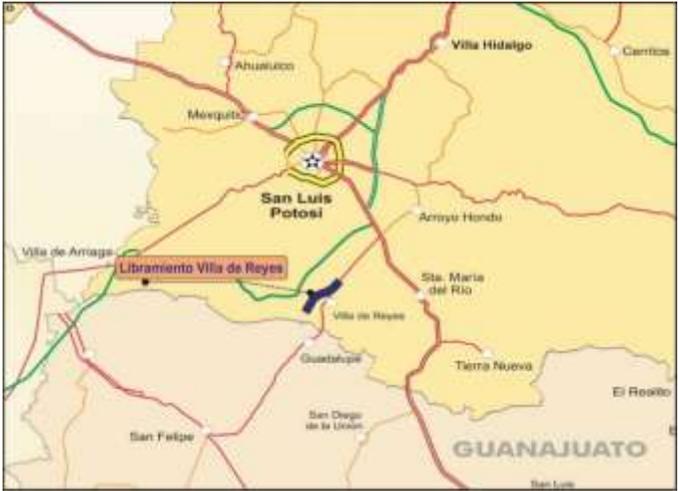
Tabla A.10 Ficha técnica del Libramiento Cd. Valles - Tampico, tr. Tamuín - Tampico

Nombre:	Cd. Valles - Tampico, tr. Tamuín - Tampico	
Clave	138	
Ruta:	MEX – 070	
Descripción:	<ul style="list-style-type: none"> Consiste en la construcción de un cuerpo paralelo con 10.5 m. de ancho de corona en 50.1 kilómetros de longitud, con una sección transversal tipo “A4S”, para alojar 4 carriles de circulación, dos en cada sentido, de 3.5 metros cada uno y acotamientos laterales de 2.5 y 1.0 metros 	
Velocidad de Diseño:	90 km/h	
TDPA estimado:	6,360 Vehículos	
Tipo de Carpeta:	Concreto Asfáltico	
Longitud Total:	49.4 km	
Ahorro de Tiempo de Viaje:	25 min	
Tiempo de Viaje del Libramiento:	52.6666 min	
Inversión Total:	\$ 1,100 mdp	
Población Beneficiada:	460,783 habitantes de Cd. Valles, Tamuín y Ebano.	

Fuente: Elaboración propia con información de la SSI.

Tabla A.11 Ficha técnica del Libramiento Villa de Reyes

Nombre:	Libramiento Villa de Reyes
Clave	24010
Ruta:	MEX – 070
Descripción:	<ul style="list-style-type: none"> El proyecto consiste en la construcción de un libramiento al poniente de Villa de Reyes, a 12 m. de ancho de corona, para alojar dos carriles de circulación de 3.5 m y acotamientos laterales de 2.5 m, incluye los entronques: Las Rusias I Km 135+974, Las Rusias II Km 136+999, Villa de Reyes Km 139+611 y Termoeléctrica I Km 143+200, así como un PSVFFCC Km. 141+130.
Velocidad de Diseño:	90 km/h
TDPA estimado:	12,080 Vehículos
Tipo de Carpeta:	Concreto Asfáltico
Longitud Total:	4.6 km
Ahorro de Tiempo de Viaje:	20 min
Tiempo de Viaje del Libramiento:	3.0666 min
Inversión Total:	\$ 338 mdp
Población Beneficiada:	86,690 habitantes en el municipio de Villa de Reyes



Fuente: Elaboración propia con información de la SSI.

Tabla A.12 Ficha técnica del Libramiento Norponiente de San Luis Potosí (Cuota)

Nombre:	Libramiento Norponiente de San Luis Potosí (Cuota)	
Clave	S/C	
Ruta:	MEX – 057D	
Descripción:	<ul style="list-style-type: none"> El proyecto consiste en la construcción de un libramiento de dos carriles de circulación con acotamientos laterales, que se desarrollará entre la carretera San Luis Potosí-Zacatecas y el Libramiento Oriente de San Luis Potosí. 	
Velocidad de Diseño:	90 km/h	
TDPA estimado:	3,560 Vehículos	
Tipo de Carpeta:	Asfáltica	
Longitud Total:	31.2 km	
Ahorro de Tiempo de Viaje:	45 min	
Tiempo de Viaje del Libramiento:	20.8 min	
Inversión Total:	\$ 1,166 mdp	
Población Beneficiada:	1,040,443 habitantes de los municipios de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez.	

Fuente: Elaboración propia con información de la SSI.

Tabla A.13 Ficha técnica del Libramiento de Mazatlán

Nombre:	Libramiento de Mazatlán
Clave	25604
Ruta:	MEX
Descripción:	<ul style="list-style-type: none"> El proyecto se ubica al noreste de Mazatlán y constituye el extremo sur de la autopista Mazatlán - Culiacán. El libramiento de Mazatlán tiene una sección tipo A4 para alojar 4 carriles de circulación y se desarrolla entre Villa Unión y la salida de la ciudad hacia el norte.
Velocidad de Diseño:	90 km/h
TDPA estimado:	6,500 Vehículos
Tipo de Carpeta:	Concreto Hidráulico
Longitud Total:	10.8 km
Ahorro de Tiempo de Viaje:	20 min
Tiempo de Viaje del Libramiento:	3.6 min
Inversión Total:	\$ 1,850.4 mdp
Población Beneficiada:	438,434 habitantes



Fuente: Elaboración propia con información de la SSI.

Tabla A.14 Ficha técnica del Libramiento de Reynosa

Nombre:	Libramiento de Reynosa
Clave	28008
Ruta:	MEX - 040
Descripción:	
<ul style="list-style-type: none"> • Construcción de una vía de 2 carriles de circulación (uno por sentido) de 3.5 m de ancho cada uno y acotamientos de 2.5 m cada uno, en una sección transversal de 12 m de ancho, para conectar la carretera federal Monterrey – Reynosa con la carretera Matamoros – Reynosa y librar la zona conurbada de Reynosa, Tamaulipas. 	
Velocidad de Diseño:	90 km/h
TDPA estimado:	5,412 Vehículos
Tipo de Carpeta:	Asfáltica
Longitud Total:	4.6 km
Ahorro de Tiempo de Viaje:	17 min
Tiempo de Viaje del Libramiento:	6.6666 min
Inversión Total:	\$ 1,500 mdp
Población Beneficiada:	903,111 habitantes de los municipios Reynosa, Río Bravo, Valle Hermoso, Gustavo Díaz Ordaz, Dr. Cross, Gral. Bravo, China, Gral. Terán, Los Ramones, Montemorelos.



Fuente: Elaboración propia con información de la SSI.

Anexo 2. Consumo de combustible de los vehículos que circulan en la red de carreteras en México

Camión articulado (T3-S3)

Tractocamión de tres ejes INTERNATIONAL 9200i con MOTOR CUMMINS ISX de 450 HP

Semirremolque de tres ejes, tipo caja de aluminio de 40 pies

Llantas 1100-20.00 normal

Consumos, por cada 1,000 veh-km

Consumo de combustible	litros	579.47
Uso de lubricantes	litros	5.45
Consumo de llantas	núm llantas nuevas equivalentes	0.39
Tiempo de operador	horas	12.21
Mano de obra de mantenimiento	horas	30.48
Refacciones	% precio vehículo nuevo	0.27
Depreciación	% precio vehículo nuevo	0.08
Intereses (tasa 1.53%)	% precio vehículo nuevo	0.00

Camión articulado (T3-S2)

Tractocamión de tres ejes INTERNATIONAL 9200i con MOTOR CUMMINS ISX de 450 HP

Semirremolque de dos ejes, tipo caja de aluminio de 40 pies

Llantas 1100-20.00 normal

Consumos, por cada 1,000 veh-km

Consumo de combustible	litros	483.92
Uso de lubricantes	litros	5.45
Consumo de llantas	núm llantas nuevas equivalentes	0.33
Tiempo de operador	horas	11.48
Mano de obra de mantenimiento	horas	30.48
Refacciones	% precio vehículo nuevo	0.27
Depreciación	% precio vehículo nuevo	0.05
Intereses (tasa 1.53%)	% precio vehículo nuevo	0.00

Camión articulado (T3-S2-R4)

Tractocamión de tres ejes INTERNATIONAL 9200i con MOTOR CUMMINS ISX de 450 HP

Semirremolque de dos ejes y remolque de cuatro ejes, tipo caja de aluminio de 40 pies.

Llantas 1100-20.00 normal

Consumos por cada 1,000 veh-km

Consumo de combustible	litros	760.89
Uso de lubricantes	litros	5.45
Consumo de llantas	núm llantas nuevas equivalentes	0.56
Tiempo de operador	horas	14.21
Mano de obra de mantenimiento	horas	30.48
Refacciones	% precio vehículo nuevo	0.27
Depreciación	% precio vehículo nuevo	0.06
Intereses (tasa 1.53%)	% precio vehículo nuevo	0.00

Camión de tres ejes

Camión pesado tres ejes INTERNATIONAL 4400 con motor NAVISTAR DT 466

Carrocería de "estacas" 2.44 x 2.10 m x 23 pies

Llantas 1100-20.00 normal

Consumos, por cada 1,000 veh-km

Consumo de combustible	litros	446.79
Uso de lubricantes	litros	3.37
Consumo de llantas	núm llantas nuevas equivalentes	0.24
Tiempo de operador	horas	13.41
Mano de obra de mantenimiento	horas	12.43
Refacciones	% precio vehículo nuevo	0.21
Depreciación	% precio vehículo nuevo	0.06
Intereses (tasa 1.53%)	% precio vehículo nuevo	0.00

Camión de dos ejes

Camión pesado dos ejes INTERNATIONAL 4300 con motor NAVISTAR DT 466

Carrocería de "estacas" 2.44 x 2.10 m x 22 pies

Llantas 1100-20.00 normal

Consumos, por cada 1,000 veh-km

Consumo de combustible	litros	328.45
Uso de lubricantes	litros	3.37
Consumo de llantas	núm llantas nuevas equivalentes	0.16
Tiempo de operador	horas	13.09
Mano de obra de mantenimiento	horas	8.18
Refacciones	% precio vehículo nuevo	0.15
Depreciación	% precio vehículo nuevo	0.06
Intereses (tasa 1.53%)	% precio vehículo nuevo	0.00

Autobús foráneo

Autobús integral foráneo, con motor SCANIA DC12 02 EPA de 380 HP

Sin aire acondicionado

Llantas 1100-22.00 normal

Consumos, por cada 1,000 veh-km

Consumo de combustible	litros	398.63
Uso de lubricantes	litros	3.37
Consumo de llantas	núm llantas nuevas equivalentes	0.26
Tiempo de operador	horas	11.47
Mano de obra de mantenimiento	horas	11.06
Refacciones	% precio vehículo nuevo	0.13
Depreciación	% precio vehículo nuevo	0.05
Intereses (tasa 1.53%)	% precio vehículo nuevo	0.00

Vehículo ligero

URVAN Nissan, con motor de 139 HP

Llantas Firestone convencionales

Consumos, por cada 1,000 veh-km

Consumo de combustible	litros	172.08
Uso de lubricantes	litros	1.85
Consumo de llantas	núm llantas nuevas equivalentes	0.06
Tiempo de operador	horas	10.68
Mano de obra de mantenimiento	horas	2.15
Refacciones	% precio vehículo nuevo	0.14
Depreciación	% precio vehículo nuevo	0.40
Intereses (tasa 1.53%)	% precio vehículo nuevo	0.02



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado-Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México
CP 76703
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad
certificada bajo la norma ISO 9001:2015