

Sustentabilidad de los corredores de transporte de carga en América del Norte

Retos y oportunidades

Texas Transportation Institute
Texas A&M University System
College Station, Texas



cec.org

RESUMEN

Este documento presenta un estudio de caso para determinar los efectos ambientales atmosféricos, incluidas las emisiones de contaminantes de criterio y gases de efecto invernadero, derivados del movimiento de carga camionero y ferroviario de la Ciudad de México a Montreal. Se recopilaron datos de la red carretera y de la actividad de carga para dicho corredor para un caso base (correspondiente a 2010) y un caso futuro (correspondiente a 2035). Las tasas de emisión para el estudio de caso se obtuvieron del modelo de emisiones MOBILE6.2 de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (*US Environmental Protection Agency, EPA*), usando los parámetros promedio —como la distribución de la edad de los vehículos— de los datos de registro vehiculares de ese país. Los cálculos de las emisiones ferroviarias se basan en las tasas promedio de emisiones y consumo de combustible estadounidenses, y fueron objeto de revisión para reflejar las actuales mejoras en las normas de los motores de las locomotoras.

Los resultados muestran que el movimiento de carga seguirá generando grandes cantidades de emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Los actuales niveles de las emisiones ferrocarrileras no son significativos frente a los de los camiones. Sin embargo, proporcionalmente la participación de las primeras en cuanto a ciertos contaminantes se incrementará con el tiempo debido al alza proyectada del movimiento de carga ferroviario, junto con una baja significativa de los contaminantes de criterio provenientes de los camiones como resultado de normas de emisiones más estrictas y el mejor diseño de los motores.

Se convocó a un grupo de expertos para analizar los resultados y formular recomendaciones adicionales. Por las amplias diferencias entre las operaciones de los camiones y los ferrocarriles en términos de rutas y prácticas de operación, se recomienda que los análisis de unos y otros se realicen por separado para aquilatar los efectos ambientales y en la calidad del aire. Se determinó también que las fuentes nuevas de datos, como los GPS y las bitácoras de los motores, pueden conducir al mejoramiento de la precisión del monitoreo. Con todo, el uso de estos posibles recursos exige la cooperación entre la industria de carga y las dependencias del transporte y del medio ambiente.

El presente documento de antecedentes fue preparado por el Texas Transportation Institute y la Texas A&M University System, College Station, Texas, para el Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA). La información contenida no necesariamente refleja la perspectiva de la CCA o de los gobiernos de Canadá, Estados Unidos y México.

Se permite la reproducción total o parcial del documento, en cualquier forma o medio, con propósitos educativos y sin fines de lucro, sin que sea necesario obtener autorización especial por parte del Secretariado de la CCA, siempre y cuando se cite debidamente la fuente. La CCA apreciará que se le envíe una copia de toda publicación o material que utilice este trabajo como fuente.

A menos que se indique lo contrario, el presente documento está protegido mediante licencia de tipo "Reconocimiento - Sin obra derivada - No comercial", de Creative Commons.



Comisión para la Cooperación Ambiental, 2010

Particularidades de la publicación

Tipo de publicación: documento de antecedentes

Fecha de la publicación: septiembre de 2010

Idioma original: inglés

Procedimiento de revisión y aseguramiento de la calidad:

Primera revisión de las Partes: 28 de mayo a 25 de junio de 2010

QA09.23

Available in English / Disponible en français

Para mayor información:

Comisión para la Cooperación Ambiental

393, rue St-Jacques ouest, Bureau 200

Montreal (Quebec) Canadá H2Y 1N9

t 514.350.4300 f 514.350.4372

<info@cec.org> / <www.cec.org>



ÍNDICE

Lista de gráficas	iii
Lista de cuadros	iv
Introducción	1
Contexto y estudios previos	2
Impactos ambientales del movimiento de mercancías	2
Emisiones de contaminantes atmosféricos de criterio	2
Emisiones e inventarios de GEI	2
Escenario futuro de los efectos del transporte de carga	3
Estimación de los GEI y sus efectos en la calidad del aire	4
Congestionamiento en los corredores de transporte de carga.....	5
Causas de retardos y congestionamientos	5
Impactos y mitigación.....	6
Medición del desempeño y datos de la carga	7
Medición del desempeño del transporte	7
Medición del desempeño del transporte de carga	7
Fuentes y disponibilidad de datos.....	8
Medidas de mitigación en relación con la calidad del aire	9
Estudio de caso: corredor Ciudad de México-Montreal.....	12
Enfoque del estudio y fuentes de datos.....	13
Metodología para el cálculo de las emisiones.....	17
Cálculo de las emisiones de los camiones de carga	17
Cálculo de las emisiones de las locomotoras de carga.....	19
Análisis de los resultados.....	21
Cálculo de las emisiones generadas por el transporte de carga en los cruces fronterizos.....	33
Problemas, retos y oportunidades	35
Alcance del análisis y contaminantes atmosféricos.....	35
Metodologías de estimación	36
Los datos necesarios y sus fuentes	37
Fuentes de datos	37
Actividad camionera	38
Datos sobre la red y las rutas	39
Tasas de emisión del sector camionero.....	39
Emisiones y transporte ferroviario de mercancías	40
Mediciones del desempeño.....	40
Estrategias de mitigación.....	41
Señalamientos finales.....	41
Apéndice A: Proyecciones de emisiones de CO₂ a 2035.....	42
Apéndice B: MOVES y MOBILE6.2.....	43

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Corredores carretero y ferroviario, Ciudad de México-Montreal	14
Gráfica 2. Análisis de las emisiones anuales del flujo camionero a lo largo del corredor Ciudad de México-Montreal	18
Gráfica 3. Proceso de análisis de las emisiones ferroviarias anuales en el corredor Ciudad de México-Montreal	20
Gráfica 4. Emisiones estimadas de CO ₂ del transporte carretero en el corredor, 2010 y 2035	23
Gráfica 5. Emisiones estimadas de CO del transporte carretero en el corredor, 2010 y 2035.....	24
Gráfica 6. Emisiones estimadas de NO _x del transporte carretero en el corredor, 2010 y 2035	25
Gráfica 7. Emisiones estimadas de hidrocarburos totales (HC totales) del transporte carretero en el corredor, 2010 y 2035	26
Gráfica 8. Emisiones estimadas de PM ₁₀ del transporte carretero en el corredor, 2010 y 2035	27
Gráfica 9. Emisiones estimadas de CO ₂ del transporte ferroviario en el corredor, 2010 y 2035	28
Gráfica 10. Emisiones estimadas de CO del transporte ferroviario en el corredor, 2010 y 2035.....	29
Gráfica 11. Emisiones estimadas de NO _x del transporte ferroviario en el corredor, 2010 y 2035	30
Gráfica 12. Emisiones estimadas de hidrocarburos totales (HC totales) del transporte ferroviario en el corredor, 2010 y 2035	31
Gráfica 13. Emisiones estimadas de PM ₁₀ del transporte ferroviario en el corredor, 2010 y 2035	32
Gráfica 14. Volúmenes anuales de cruces camioneros fronterizos a Estados Unidos en Laredo, Texas	33
Gráfica 15. Distribución por modelo (año) de los camiones de arrastre en Laredo, según estudio del TTI realizado en 2006.....	34
Gráfica 16. Emisiones anuales en el puerto de entrada de Laredo.....	35

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Estrategias de reducción de las emisiones de camiones y ferrocarriles.....	10
Cuadro 2. Longitud del corredor en estudio, por país y modo	13
Cuadro 3. Datos necesarios para el análisis de los efectos del transporte de carga en la calidad del aire, por corredor	15
Cuadro 4. Factores de emisión promedio de la flotilla de locomotoras.....	19
Cuadro 5. Monto anual total de las emisiones debidas al movimiento de mercancías en el corredor Ciudad de México-Montreal	22
Cuadro 6. Alcance de los efectos y precisión de los datos sobre contaminantes atmosféricos del transporte	36

INTRODUCCIÓN

El Marco de Trabajo Analítico para la Evaluación de los Efectos Ambientales del Tratado de Libre Comercio de América del Norte de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA)¹ se ocupa de diversas inquietudes: calidad del aire y el agua, recursos terrestres, biodiversidad, cambio climático del planeta. El transporte de carga influye en algunos de estos aspectos, pero puede tener otras repercusiones importantes, como la contaminación acústica, la degradación de los recursos naturales, la contaminación por residuos peligrosos y diversas consecuencias socioeconómicas.

La mayor parte del transporte de carga de América del Norte se realiza mediante camiones y locomotoras con motores diésel, que figuran entre las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otras que dañan la salud humana, como óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas suspendidas (PM). Así, los efectos del transporte de carga en la calidad del aire son un tema importante tanto en términos de cambio climático y emisiones de GEI cuanto de emisiones de otros contaminantes dañinos.

El estudio trabajo tiene por objeto generar un enfoque que permita examinar las implicaciones de los principales corredores de transporte de carga en la calidad del aire, con la perspectiva de reducir sus efectos ambientales. Puesto que concentran el flujo de tráfico, estos corredores son las partes más congestionadas del sistema de transporte de carga de superficie, por lo que exigen atención especial en términos de la evaluación de los efectos ambientales del movimiento de mercancías. Unos cuantos estudios se han ocupado de los efectos del transporte de carga en las emisiones de GEI en un corredor, pero en ningún caso el análisis se ha efectuado desde la perspectiva del monitoreo del desempeño. El equipo de investigación aborda las metas generales del proyecto por medio de las siguientes etapas:

- realización de un análisis completo de los estudios dedicados a examinar el impacto ambiental del movimiento de mercancías, la pertinencia de aplicar mediciones de desempeño, las necesidades y la disponibilidad de datos, y otros temas pertinentes;
- definición de un enfoque para evaluar la calidad del aire y las emisiones de gases de invernadero en relación con el movimiento de carga en los corredores de transporte;
- aplicación de esta metodología al estudio de caso de un importante corredor de transporte de carga que va de la Ciudad de México a Montreal para determinar los efectos del movimiento ferroviario y camionero en la calidad del aire, y
- análisis de los hallazgos y las conclusiones con un grupo consultor de expertos integrado por profesionales del transporte con experiencia en la sustentabilidad del transporte de carga.

Asimismo, el estudio busca llenar un vacío en la actual comprensión de los efectos de los GEI y otras repercusiones atmosféricas del transporte de carga en los corredores. En conjunto, estos recursos ofrecen un contexto para determinar los temas, las oportunidades y los desafíos relacionados con la elaboración de un análisis de los efectos del movimiento de mercancías en la calidad del aire en los corredores de transporte. En los siguientes apartados se presentan la revisión de antecedentes y estudios previos, las conclusiones del estudio de caso y un análisis de los temas, los desafíos y las oportunidades del análisis del movimiento de mercancías y sus efectos en la calidad del aire.

¹ Comisión para la Cooperación Ambiental, *Evaluación de los efectos ambientales del Tratado de Libre Comercio de América del Norte: El marco de trabajo analítico (Fase II) y estudios temáticos*, Serie Medio Ambiente y Comercio, núm. 6, CCA, Montreal, 1999.

CONTEXTO Y ESTUDIOS PREVIOS

Este apartado cubre los antecedentes de los efectos ambientales del transporte de carga de superficie, el impacto del congestionamiento y los embotellamientos en los corredores de transporte, la medición del desempeño y los datos de carga empleados para medir tal desempeño, así como las diversas medidas de mitigación de la calidad del aire de que se dispone para reducir los impactos atmosféricos a lo largo de los corredores del transporte de carga.

Impactos ambientales del movimiento de mercancías

Emisiones de contaminantes atmosféricos de criterio

La mayor parte del transporte de carga en América del Norte la mueven camiones y locomotoras propulsados por motores diésel. Dichos motores emiten cantidades importantes de NO_x, PM y compuestos orgánicos volátiles (COV). Tanto los NO_x como los COV son precursores del ozono de bajo nivel (o ambiental o troposférico), el cual puede desencadenar una variedad de problemas de salud, como algunas enfermedades respiratorias graves. Al ozono se le asocia también con otros efectos ambientales adversos, como daños en los cultivos y las plantas en ecosistemas naturales. La exposición a las PM también se relaciona con importantes problemas de salud, por ejemplo la agravación del asma, dificultades respiratorias y enfermedades cardiovasculares; puede incluso causar muerte prematura. Asimismo, las PM son la fuente principal de la niebla que reduce la visibilidad y genera condiciones inseguras para la operación de aviones y otros medios de transporte. En Estados Unidos, los NO_x, el CO y los COV figuran entre los siete contaminantes atmosféricos de criterio normados por la Agencia de Protección Ambiental (*US Environmental Protection Agency, EPA*) de ese país.

Los tres signatarios del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), es decir Canadá, Estados Unidos y México, miden las concentraciones atmosféricas de COV, NO_x, ozono troposférico y PM. Cada país aplica también otras normas para contaminantes específicos, como el plomo (Pb) y el dióxido de azufre (SO₂). La vigilancia de la contaminación atmosférica en Estados Unidos se basa en un sistema centralizado cuyo órgano responsable es la EPA. El ministerio de Medio Ambiente de Canadá tiene también un sistema centralizado de monitoreo, al tiempo que algunas provincias —de manera destacada Quebec— también monitorean la contaminación atmosférica y han establecido políticas legislativas respecto de los GEI. En México, por otra parte, el sistema de monitoreo está semicentralizado: lo realizan los gobiernos locales, pero la coordinación corre a cargo del Instituto Nacional de Ecología (INE) en términos del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (Sinaica).^{2,3}

Emisiones e inventarios de GEI

El transporte de carga es también una fuente importante de emisiones de dióxido de carbono (CO₂). En términos de volumen, el CO₂ es el GEI que más contribuye al cambio climático. A diferencia de los contaminantes de criterio de fuentes puntuales, cuyos niveles pueden reducirse con tecnologías de disminución de emisiones, los GEI derivados del comercio tienen orígenes

² Sierra Club, *NAFTA Transportation Corridors: Approaches to Assessing Environmental Impacts and Alternatives*, Washington, D.C., 2000 <http://www.cec.org/programs_projects/trade_envIRON_econ/pdfs/sierra.pdf>.

³ Foro de Cooperación Económica Asia Pacífico, *Mexico: Report of Air Pollution Control Equipment and Services*, 2009 <<http://egs.apec.org/more-articles/133-mexico-report-of-air-pollution-control-equipment-and-services>>.

más difusos y no se reducen con facilidad. Aunque las emisiones de CO₂ generadas por el movimiento de mercancías no están reglamentadas por los gobiernos de los países del TLCAN, el transporte se considera una fuente posible de futuras reducciones significativas de GEI.

La cuantificación de las emisiones de GEI, también denominada inventario de emisiones de GEI, es muchas veces el primer paso para aplicar medidas al respecto. Los inventarios se suelen emplear en contextos reglamentarios para dar un sentido de escala a los niveles de las emisiones. Con frecuencia también son el punto de partida en la formulación de planes de acción para establecer metas y objetivos cuantificables. La EPA de Estados Unidos elabora un inventario nacional anual de emisiones de GEI. Hoy día al menos 40 entidades federativas de ese país han creado inventarios de emisiones de dichos gases; algunas tienen planes de acción sobre los GEI, mientras que otras incluyen específicamente las emisiones de CO₂ relacionadas con el transporte en sus planes energéticos o en la normativa del medio ambiente.

Escenario futuro de los efectos del transporte de carga

Se prevé que la contribución relativa del transporte de carga a la contaminación atmosférica crecerá en el futuro conforme baje la participación del movimiento de pasajeros debido a combustibles más eficientes y vehículos de operación más limpia. Además de las preocupaciones relacionadas con la salud, también es creciente la inquietud frente al cambio climático y las fuentes de GEI. Según el inventario de emisiones de GEI de la EPA,⁴ las respectivas emisiones relacionadas con el transporte de carga aumentaron 74 por ciento de 1990 a 2008, mientras que las correspondientes al transporte de pasajeros se elevaron 33 por ciento y todas las fuentes 14 por ciento.

La intensidad de las emisiones del transporte de carga, medida en toneladas de emisiones equivalentes de CO₂ (CO₂eq) por kilómetro de carga, ha crecido mucho desde 1990. Esta tendencia es resultado, sobre todo, del incremento en el uso de modos de transporte intensivos en energía —en particular, camiones de carga, que ofrecen un servicio más rápido y seguro, pero a costa de menor eficiencia energética—, así como también de un mucho mayor uso de la entrega de mercancías sobre demanda. El inventario de GEI de la EPA muestra que los camiones de carga representan 21 por ciento del total de las emisiones de GEI del sector transporte en Estados Unidos. La participación del sector camionero en el total de toneladas por kilómetros de carga en ese país subió de 19 por ciento en 1980 a 29 por ciento en 2007.⁵ Con base en las proyecciones del consumo de energía de 2008 a 2035, el *Annual Energy Outlook 2010* prevé un aumento de 52 por ciento en las emisiones de CO₂ del transporte camionero de carga entre 2010 y 2035.⁶ Un estudio de 2001 preparado para la CCA⁷ muestra que en el escenario base de crecimiento para 2020 las emisiones de CO₂ derivadas del comercio del TLCAN en los cinco corredores estudiados se multiplicarán por cuatro frente a los niveles de 1999.

⁴ EPA de Estados Unidos, *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2008*. Washington, DC, 2010

<http://www.epa.gov/climatechange/emissions/usinventoryreport.html>.

⁵ Oficina de Estadísticas del Transporte de Estados Unidos (*US Bureau of Transportation Statistics*) http://www.bts.gov/publications/national_transportation_statistics/html/table_01_46b.html.

⁶ Administración de la Información sobre la Energía de Estados Unidos (*US Energy Information Administration*), cuadro 67, *Freight Transportation Energy Use*, abril de 2010 http://www.eia.doe.gov/oiat/aeo/supplement/suptab_67.xls. Para los cálculos, véase el apéndice A>.

⁷ ICF International, *North American Trade and Transportation Corridors: Environmental Impacts and Mitigation Strategies*, 2001.

Estimación de los GEI y sus efectos en la calidad del aire

Son varios los enfoques disponibles para formular inventarios de emisiones de GEI y cálculos de las emisiones contaminantes. Las metodologías empleadas para elaborar dichos inventarios se dividen en tres categorías generales: enfoques arriba-abajo, en los que los datos se agregan y el cálculo se basa en la cantidad de combustible vendido; enfoques abajo-arriba, que se apoyan en datos de uso último y de actividad de uso para estimar la cantidad de combustible empleado por la actividad de los estudios, y enfoques híbridos, que combinan ambas perspectivas. Debido a la gran precisión —por cuestiones fiscales— de los datos del combustible usado, los inventarios arriba-abajo tienden a ser más precisos pero a menudo carecen del grado de detalle que ofrecen los enfoques abajo-arriba, ya que tienden a ser menos sensibles respecto de los cambios internos y ello puede limitar el análisis de las medidas de mitigación.⁸ La exactitud de los enfoques arriba-abajo disminuye conforme aumentan los niveles de detalle del análisis (por ejemplo, sectorial) porque es mayor el número de supuestos necesarios para desagregar los cálculos de todo el sistema.

Son varias las herramientas analíticas disponibles para analizar los efectos de los GEI derivados del transporte; cada una posee capacidades diferentes y requiere niveles distintos de insumo de datos. La selección de una herramienta analítica para analizar los GEI de las actividades de transporte depende de dos factores: el modo de transporte investigado, por un lado, y el nivel necesario de detalle y la disponibilidad de datos, por el otro. Según ICF, los enfoques recomendados para cada nivel de análisis son:

- para los niveles nacionales y estatales: un enfoque arriba-abajo basado en la herramienta para inventario estatal de la EPA (*State Inventory Tool, SIT*) y un enfoque abajo-arriba basado en el modelo de simulación de emisiones de vehículos automotores (*Motor Vehicle Emission Simulator, MOVES*) también de la EPA;
- para los niveles regionales o locales: una combinación de los enfoques arriba-abajo y abajo-arriba que integre los resultados del modelo MOVES y de la SIT, de manera similar al Inventario GEI del transporte de Nueva York, y
- para proyectos específicos: según el tipo de proyecto, se recomienda emplear ya sea herramientas específicas como los modelos MOVES y COMMUTER de la EPA y el modelo IDAS de la Administración Federal de Autopistas de Estados Unidos (*US Federal Highway Administration, FHWA*) o realizar un análisis de hoja de cálculo que combine datos y resultados.⁹

El modelo MOBILE6.2 de factores de emisión para la proyección de emisiones de hidrocarburos, monóxido de carbono (CO), NO_x, CO₂, y PM generados por autos, camiones y motocicletas en condiciones diversas es el modelo vigente de la EPA para calcular las emisiones de fuentes móviles. Las tasas de emisión se calculan con base en ciclos fijos de manejo que representan distintas condiciones de tráfico en diversos tipos de caminos. Para cada clase de vehículo, las tasas de emisión de MOBILE6.2 se expresan en gramos por kilómetro para cada velocidad promedio. En el MOBILE6.2 las tasas de emisión del CO₂ y las PM no toman en cuenta la velocidad.

El modelo más nuevo de la EPA, el MOVES, se diseñó para sustituir el MOBILE6.2. El nuevo modelo estima las emisiones de contaminantes atmosféricas de los vehículos de las autopistas

⁸ EPA de Estados Unidos, Transcripción: “Greenhouse Gases Inventory 101: Creating an Inventory” <http://www.epa.gov/climatechange/emissions/downloads/ts1_transcript.pdf>.

⁹ ICF International, *Assessment of Greenhouse Gas Analysis Techniques for Transportation Projects*, 2006.

y del equipo fuera de ruta, proporcionando análisis en múltiples escalas para un número de contaminantes y de fuentes de contaminantes mayor que los modelos previos. La primera versión oficial, MOVES2010, se presentó en diciembre de 2009 y sólo comprende vehículos en ruta; los equipos fuera de ruta estarán comprendidos en versiones futuras. La información subyacente a las emisiones del MOVES se da en tasas de emisión por segundo divididas en 23 modos de operación que representan los rangos de la velocidad instantánea y la potencia específica del vehículo (*vehicle specific power, VSP*). La potencia es una variable indirecta de la carga del motor en correlación con las emisiones. En el MOVES, la VSP representa la capacidad del vehículo normalizada con la masa del mismo. Una de las mayores ventajas del MOVES frente al MOBILE6.2 es que en el primero el CO₂, el consumo de combustible y las emisiones de PM dependen de la velocidad y el año del modelo, mientras que en el MOBILE6.2 las respectivas tasas eran sólo una función de la clasificación del vehículo. En el apéndice A se presentan más detalles sobre los datos necesarios para los modelos MOVES y MOBILE6.2.

El equipo de investigación recomienda aplicar un enfoque abajo-arriba usando los datos sobre la actividad del transporte de carga por segmento y nodo. Los principales datos de actividad necesarios para este enfoque incluyen el volumen de la carga camionera y, en el caso del transporte ferroviario, las toneladas por kilómetro movidas en cada sección del corredor en estudio. A efecto de calcular las emisiones de CO₂ relacionadas con la carga, para cada sección del corredor del estudio de caso se emplearon las tasas de emisión apropiadas de los modelos y procedimientos estándar, como MOBILE6, MOVES y las normas de emisiones de locomotoras de la EPA.¹⁰

Congestionamiento en los corredores de transporte de carga

Los retardos y los congestionamientos resultan de particular importancia cuando se analizan los aspectos de los corredores del transporte de carga relacionados con el medio ambiente y la calidad del aire. Los retrasos se definen por lo general en términos del tiempo adicional que se invierte en el transporte, más allá de lo esperado según los tiempos de viaje con “flujo libre” y sin restricciones. Los retardos en el movimiento de carga siguen generando efectos ambientales negativos, sobre todo en la calidad del aire, en el caso de la industria del transporte de carga. En la actualidad este último contribuye con cerca de la mitad de las emisiones de NO_x de fuentes móviles y 36 por ciento de las PM₁₀ (partículas suspendidas de 10 o menos micras de diámetro) de las emisiones de fuentes móviles.¹¹

Causas de retardos y congestionamientos

Hay una correlación positiva entre los cuellos de botella (donde se producen retardos o congestionamiento) y la demanda de transporte de carga; conforme aumenta la demanda crecen el número y la duración de los cuellos de botella. Éstos, cuando se trata de camiones, suelen medirse con la razón de los volúmenes de tráfico frente a la capacidad física real de las autopistas. Los cuellos de botella recurrentes se presentan más a menudo en los puntos de interconexión de carga, los sitios de congestionamiento general de tráfico y los puntos de entrega. Los centros de interconexión se definen como los puertos, aeropuertos y puntos de cruce fronterizos. Estos puntos generan congestionamientos durante los momentos de mayor actividad de entrega. El congestionamiento general también puede presentarse en intersecciones con una sincronización de señales inadecuada, pendientes acusadas o vías férreas de un solo sentido. Los puntos de entrega de carga pueden generar congestionamientos cuando en el destino final el espacio es limitado o se carece de

¹⁰ EPA de Estados Unidos, *Locomotive Emissions Standards, Regulatory Support Document*, 1998 <www.epa.gov/oms/regs/nonroad/locomotv/frm/locorsd.pdf>.

instalaciones de descarga apropiadas. El congestionamiento no recurrente, que muchas veces es mayor que el recurrente, se da en situaciones no previsible, como accidentes de tránsito, zonas en obra o mal tiempo. Al margen de la causa, los congestionamientos influyen en la duración y el número de los trayectos, así como en los efectos ambientales generados por interrupciones del tránsito vehicular.^{11, 12}

Impactos y mitigación

Los cuellos de botella tienen consecuencias cada vez más graves en el transporte de carga. Los densos corredores urbanos interestatales son los más afectados por el congestionamiento; sin embargo, sin mejoras de infraestructura las repercusiones se extenderán a segmentos de autopistas interurbanas en zonas rurales y urbanas. La mayor parte de los retrasos en el transporte camionero en Estados Unidos ocurre en los 10 principales entronques: una tasa promedio de 1.5 millones anuales de horas-camión perdidas en cada uno. Otros cuellos de botella dan cuenta, cada uno, de sólo 250,000 horas anuales de retraso camionero.^{11, 12}

El congestionamiento ferroviario también aumentará si no se realizan mejoras tanto de capacidad como en el sistema. La Asociación Ferroviaria de Estados Unidos (*Association of American Railroads*, AAR) pronostica que en 2035 la longitud de las ubicaciones congestionadas aumentará de 173 a 25,600 kilómetros y, si el sistema no se moderniza, los 10,261 kilómetros actualmente afectados por incidentes o interrupciones se elevarán a más de 19,200.¹¹

Se espera que la disminución de los retrasos de carga en los puntos más congestionados de los cruces fronterizos reduzca de manera considerable las emisiones.^{11, 13, 14} Los estudios de origen-destino y de retraso fronterizo son insumos esenciales para el análisis de los efectos en la calidad del aire de los movimientos de mercancías, por lo que deberían convertirse en una constante en la recopilación de datos. Además de atender las preocupaciones ambientales, ello contribuiría a apoyar nuestra capacidad de monitoreo del congestionamiento fronterizo.¹³

El Departamento de Transporte de Estados Unidos (*US Department of Transportation*, DOT) sugiere diversas mejoras en las operaciones de carga y los métodos para abordar las preocupaciones ambientales. Recomienda mejorar el sistema de carga modificando la gestión y las operaciones de las actuales instalaciones, conservando y dando mantenimiento a la infraestructura actual y explorando oportunidades de privatización. Algunas mejoras ambientales sugeridas por el Departamento incluyen la búsqueda de tecnologías de reducción de la contaminación, inversiones para mitigar los impactos ambientales del transporte, estrategias de conservación de la energía y uso de combustibles alternativos en las operaciones de carga.^{12, 15}

¹¹ Schmitt, R., E. Strocko y J. Sedor, *Freight Story 2008*, FHWA-HOP-08-051, 2008

<http://www.ops.fhwa.dot.gov/freight/freight_analysis/freight_story/index.htm>.

¹² Cambridge Systematics Inc., "An Initial Assessment of Freight Bottlenecks on Highways", documento preparado por la Oficina de Estudios de Política de Transporte adscrita a la Administración Federal de Autopistas (*Federal Highway Administration Office of Transportation Policy Studies*), 2005 <<http://www.fhwa.dot.gov/policy/otps/bottlenecks/index.htm>>.

¹³ ICF Consulting, *Efectos ambientales y estrategias de mitigación en los corredores de comercio y transporte de América del Norte*, preparado para la Comisión para la Cooperación Ambiental, 2001.

¹⁴ *Border Congestion Study: Study Findings and Methodology*, preparado para la Western Governors' Association por Parsons Transportation Group y Suma Sinergia, S.A. de C.V., 9 de junio de 2000.

¹⁵ Departamento del Transporte de Estados Unidos, "Freight Transportation", <www.freight.dot.gov/freight_framework>.

Estas mejoras para mitigar los retrasos y los congestionamientos del transporte de carga son factibles si la Administración Federal de Autopistas de Estados Unidos (FHWA) se coordina con estados, organismos de planeación metropolitana, municipios e industria del transporte de carga para avanzar en la recolección y el análisis de los datos sobre la red de los cuellos de botella.¹² El sistema ferroviario de carga ha emprendido mejoras del sistema y en 2006 invirtió 8,500 millones de dólares en la renovación del tendido férreo, infraestructura y equipo, así como en una expansión adicional del tránsito.¹⁶

Medición del desempeño y datos de la carga

Medición del desempeño del transporte

La medición del desempeño se originó en el sector privado como herramienta administrativa para evaluar los avances hacia la consecución de las metas mediante resultados u objetivos mensurables. La medición del desempeño traduce datos y estadísticas en información concisa y de fácil comprensión para los sectores interesados: ingenieros, administradores, responsables de políticas y ciudadanos en general. La medición del desempeño puede emplearse en todos los niveles de una organización para dar seguimiento a su proceder, evaluar alternativas para la selección de proyectos y su uso para la comunicación interna y externa. Una medición completa del desempeño ofrecería información sobre las condiciones, las tendencias temporales y el peso relativo de los diversos sectores, dependencias y actores.¹⁷ Los términos “indicador del desempeño” y “medición de desempeño” hacen referencia a variables que propician este avance.

La medición del desempeño proporciona a los sistemas de transporte la capacidad para entender la forma en que éstos se desempeñan en la actualidad y perfilar la forma en que pueden desempeñarse en el futuro como resultado de factores como las expectativas del crecimiento de la población, las actuales estrategias de inversión, los patrones en el uso del suelo y las condiciones económicas. Un buen sistema de medición del desempeño empleado por una organización debe centrarse en sus productos, misión y metas. La jerarquía usual en la ingeniería y la planeación del transporte entraña metas con objetivos claramente definidos y cuantificados en última instancia con mediciones del desempeño.¹⁸ Este enfoque garantiza que los cambios en los indicadores de desempeño representen de manera adecuada los avances hacia la consecución de un objetivo.

Medición del desempeño del transporte de carga

Según la FHWA,¹⁹ “la medición del desempeño del transporte de carga ayuda a identificar las mejoras que el transporte necesita y a supervisar su eficacia y eficiencia. Sirve también como indicador de la salud económica y el congestionamiento de tráfico”. Con el aumento constante de los embarques mundiales de bienes comerciales e industriales, el flujo de carga depende cada vez más de infraestructuras de diversa calidad y complejidad, así como de las

¹⁶ Departamento del Transporte de Estados Unidos, Administración Federal de Autopistas, “Freight Management and Operations”,

<http://ops.fhwa.dot.gov/freight/freight_analysis/freight_story/congestion.htm>.

¹⁷ J. Zietsman y L. R. Rilett, *Sustainable Transportation: Conceptualization and Performance Measures*, SWUTC/02/167403-1, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, College Station, Texas, 2002.

¹⁸ R. Harrison *et al.*, *Developing Freight Highway Corridor Performance Measure Strategies in Texas*, CTR Technical Report, FHWA/TX-07/0-5410-1, Austin, Texas, 2006.

¹⁹ FHWA, “Freight Performance Measurement”,

<http://ops.fhwa.dot.gov/freight/freight_analysis/perform_meas.htm>.

características operativas y logísticas de los sistemas de transporte. Los sectores pertinentes necesitan mediciones de desempeño para determinar si estos sistemas tienen la capacidad de mover las mercancías con eficiencia y seguridad y de manera ambientalmente adecuada.

En la actualidad, la mayor parte de las mediciones de desempeño del transporte de carga usadas o propuestas por las dependencias del transporte cubren aspectos relativos a la eficiencia y la seguridad de los movimientos de mercancías, pero no se tiene ni se ha propuesto un sistema para medir las emisiones correspondientes.

Fuentes y disponibilidad de datos

Los datos son la “materia prima” para realizar mediciones de desempeño. La disponibilidad de datos es componente esencial de un sistema de medición de desempeño; su obtención puede ser costosa y difícil. Para cada posible medición de desempeño debe analizarse la disponibilidad de datos como principal criterio de selección. Otro aspecto de la disponibilidad de datos es si es factible su recopilación, incluso si éstos están disponibles. Ocuparse de los requisitos de datos en la medición de desempeño incluye dar respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Los datos están al alcance en bases de datos actualmente disponibles?
- Si los datos están disponibles, ¿es fácil recopilarlos, o su obtención plantea dificultades?
- ¿Se dispone de nuevas formas para elaborar o recopilar los datos?
- ¿Cuál es el costo de recopilar los datos adecuados?

Los datos sobre el transporte de carga están disponibles en varias fuentes públicas y privadas. Los métodos de recolección, el marco temporal, el formato y la calidad no son todos iguales. Los que poseen las empresas privadas pueden ser de gran utilidad, pero su obtención suele ser muy onerosa o bien se guardan en calidad de confidencialidad comercial. Ejemplos de datos privados cuya obtención es muy costosa son los de US Inland Trade Monitor (USITM) y Transearch by Global Insight.²⁰

La Base de Datos de Transporte de Carga Transfronterizo de América del Norte (*North American Transborder Freight Database, NATFD*) es la principal fuente de información pública sobre el flujo del comercio en América del Norte.²¹ Contiene información del flujo de carga por tipo de mercancía y modo de transporte (ferroviario, carretero, por ducto, aéreo, marítimo y fluvial, y otros) procedente de o con destino a Canadá y México desde la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN). Los datos muestran el movimiento de carga por tipo de mercancía o por detalles geográficos. La información abarca desde 1994 hasta el año en curso y se usa para realizar estudios sobre corredores de comercio, planeación de infraestructura de transporte, planes de mercadotecnia y logística y otros fines.

La información de la NATFD contiene datos agregados con información de estado a estado o de estado a provincia. Aunque este grado de agregación podría ser adecuado para la planeación en gran escala y el estudio de los corredores, su uso resulta problemático cuando el análisis es más detallado, por ejemplo en estudios específicos sobre la calidad del aire.

La única información pública en América del Norte con datos desagregados en términos geográficos sobre el flujo de carga es la del Marco de Evaluación del Transporte de Carga

²⁰ Global Insight, “North American Commerce & Transport Data”, <<http://www.globalinsight.com/ProductsServices/ProductDetail1024.htm>>.

²¹ Base de Datos de Transporte de Carga Transfronterizo de América del Norte (*North American Transborder Freight Database, NATFD*), véase <<http://www.bts.gov/programs/international/transborder/>>.

(*Freight Analysis Framework*, FAF) de la Administración Federal de Autopistas de Estados Unidos (*Federal Highway Administration*, FHWA). El FAF es una base de datos de origen y destino (O-D) de las mercancías y un marco analítico que ofrece cálculos en peso y valor de los bienes embarcados por origen, destino, mercancía y modo de transporte.²² En México y Canadá se han comenzado a elaborar herramientas similares, pero la información no está disponible al público.

Medidas de mitigación en relación con la calidad del aire

El objetivo de esta investigación es el análisis de los impactos en la calidad del aire del movimiento de mercancías en los corredores de transporte, con el fin de elaborar o recomendar estrategias de mitigación. Son diversas las estrategias de reducción de contaminantes para el sector de carga. El **cuadro 1** resume diversas opciones y estrategias citadas en los estudios revisados.

Las estrategias de ahorro de combustible se traducen directamente en reducciones de las emisiones de GEI y otros contaminantes atmosféricos. Las modificaciones vehiculares y ferroviarias que reducen la cantidad de energía usada por tonelada-kilómetro pueden muchas veces pagarse a sí mismas con los ahorros de combustible. Puede obtenerse un 10 por ciento de economía en combustible mediante una reducción de 20 por ciento en la resistencia aerodinámica.²³ El programa SmartWay Transport de la EPA estima que el uso de neumáticos de baja resistencia puede generar ahorros de combustible de 3 por ciento o más. El uso de dispositivos aerodinámicos, como reductores de vacíos, cortavientos o guardapolvos para tráiler, puede reducir el uso de combustible entre 1 y 7 por ciento, o incluso más.²⁴

²² Freight Analysis Framework (FAF), Office of Freight Management and Operations, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 2009, <http://ops.fhwa.dot.gov/freight/freight_analysis/faf/>.

²³ Blank, S., *Greening Trade Corridors*, Nueva York, marzo de 2009.

²⁴ EPA de Estados Unidos, "SmartWay Transport Partnership Verified Technologies", <<http://www.epa.gov/smartway/transport/what-smartway/verified-technologies.htm>>, mayo de 2009.

Cuadro 1. Estrategias de reducción de las emisiones de camiones y ferrocarriles

Estrategia	Ejemplos en camiones	Ejemplos en ferrocarriles
Modificación de los vehículos y las líneas ferroviarias para lograr un movimiento eficiente	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de inflado automático de neumáticos • Neumáticos de baja resistencia al rodamiento y de una en lugar de doble rueda • Mejoras aerodinámicas • Lubricantes de poca viscosidad • Camiones y tráileres más ligeros 	<ul style="list-style-type: none"> • Lubricantes de vías • Rodamientos de baja fricción • Carros ligeros
Tecnología para reducir el funcionamiento al vacío (en ralentí) de los motores	<ul style="list-style-type: none"> • Calentadores portátiles de literas • Unidades auxiliares de energía • Sistemas de encendido y apagado automáticos • Estaciones electrificadas • Políticas de reducción del funcionamiento al vacío (en ralentí) de los motores 	<ul style="list-style-type: none"> • Unidades auxiliares de electricidad • Sistemas automáticos de encendido y apagado
Estrategias de reacondicionamiento y sustitución	<ul style="list-style-type: none"> • Catalizadores de oxidación para motores diésel • Filtros de partículas del diésel • Sistemas de reducción catalítica selectiva • Modernización y reemplazo de motores • Reemplazo de camiones viejos por vehículos híbridos nuevos 	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo de las locomotoras viejas por unidades nuevas más limpias • Sistemas de cambio híbridos en patios
Combustible	<ul style="list-style-type: none"> • Biodiésel • Gas natural comprimido (uso limitado) 	<ul style="list-style-type: none"> • Diésel ultrabajo en azufre • Electrificación • Biodiésel • Gas natural comprimido
Reducción de actividades	<ul style="list-style-type: none"> • Tráileres de doble o triple apilado • Mejoras de logística para maximizar cargas y reducir viajes sin carga • Cambio a otros modos de transporte, en particular ferroviario 	<ul style="list-style-type: none"> • Trenes más largos • Vagones de doble apilado
Operación del sistema	<ul style="list-style-type: none"> • Medidas que mitiguen el congestionamiento y eviten los caminos congestionados • Optimización de rutas • Educación de conductores para un manejo más ecológico y reducción de velocidad • Programas de incentivos por eficiencia energética para los choferes 	<ul style="list-style-type: none"> • Medidas para atenuar el congestionamiento ferroviario

De igual manera, las tecnologías de reducción del funcionamiento al vacío (en ralentí) de los motores pueden también disminuir las emisiones al tiempo que se autofinancian con ahorro de combustible. Los reglamentos estadounidenses disponen que los conductores de tráileres descansen 10 horas por cada 14 de manejo. Durante estos periodos de descanso es frecuente que los camioneros dejen encendidos sus motores para crear un ambiente cómodo en la cabina y generar electricidad para dispositivos varios. Se calcula que en Estados Unidos mantener los motores encendidos en punto muerto implica un desperdicio promedio de 13 millones de galones de combustible diarios.²⁵ Los calefactores portátiles y las unidades auxiliares de electricidad proporcionan comodidad en las cabinas y permiten a los conductores apagar el motor. Los centros de reposo para camioneros y los estacionamientos con tomas de electricidad permiten que los camioneros conecten sus vehículos a ciertos servicios a un bajo costo. En el sector ferroviario el uso de controles de marcha lenta ha mostrado reducciones de 80 por ciento en el uso de locomotoras de patio, con lo que se autofinancian en dos años y medio, o menos.²⁶

Por lo general, los vehículos más nuevos son considerablemente más limpios que aquellos a los que reemplazan debido a las normas cada vez más rigurosas en materia de emisiones. Por tanto, el retiro de motores usados y su reemplazo con modelos más nuevos puede reducir de manera importante las emisiones. Como alternativa más económica de la sustitución de vehículos y motores, se tienen posibilidades de reacondicionamiento y actualización. Los filtros de partículas del diésel, que pueden ayudar a reducir las emisiones de partículas en 90 por ciento o más, son parte del equipo estándar en los modelos de camiones posteriores a 2007. Los catalizadores por oxidación sustituyen los mofles tradicionales y pueden reducir las emisiones de PM en más de 25 por ciento y las de HC en 50 por ciento.²⁷ Los sistemas de reducción catalítica selectiva (RCS) pueden reducir los NO_x cerca de 65 por ciento, al tiempo que disminuyen de manera importante las emisiones de HC y CO.²⁸ Normas más estrictas sobre emisiones de NO_x para los vehículos modelo 2010 podrían reducir las emisiones en hasta 90 por ciento, en buena medida debido a los sistemas de RCS.

Los combustibles alternativos, como biodiésel, propano y gas natural, pueden reducir los GEI al reemplazar el diésel, con alto contenido de carbono, por combustible más limpios. Niveles moderados de biodiésel (como el B20) pueden ya usarse en los motores sin mayores modificaciones o condiciones especiales. El gas natural, el hidrógeno y otros combustibles “de especialidad” requieren su propia infraestructura, tienen con frecuencia problemas de manejo o almacenamiento y requieren un motor adaptado. La eficiencia de los combustibles alternativos para reducir las emisiones varía según su fuente (por ejemplo, materias primas), tipo de producción y procesos de refinación. También se pueden presentar efectos no previstos en el medio ambiente en comparación con los combustibles tradicionales. La producción de biodiésel, por ejemplo, puede generar cambios en el uso del suelo y derivar en la conversión de paisajes naturales que secuestran carbono en fuentes emisoras del mismo. No obstante, los biocombustibles creados a partir de la biomasa residual pueden reducir de manera significativa la emisión de gases de invernadero.

²⁵ F. Stodolsky, L. Gains y A. Vyas, *Analysis of Technology Options to Reduce the Fuel Consumption of Idling Trucks*, Center for Transportation Research, Argonne National Library for the US Department of Energy, junio de 2000.

²⁶ EPA de Estados Unidos, *Case Study: Chicago Locomotive Idle Reduction Project*, Report 420-R-04-003, marzo de 2004.

²⁷ EPA de Estados Unidos, “Diesel Retrofit Technology Verification Program: Verified Technologies,” <<http://www.epa.gov/otaq/retrofit/verif-list.htm>>, mayo de 2009.

²⁸ US EPA. *Emerging Technology List*, <<http://www.epa.gov/otaq/diesel/prgemerglist.htm>>, mayo de 2009.

Las estrategias de reducción de actividades disminuyen las emisiones al bajar la necesidad del transporte. Ello puede incluir otorgar prioridad al uso de bienes locales, emplear empaques más pequeños que permitan apilar con mayor eficiencia y reducir el número de viajes necesarios mediante el aumento de la carga por viaje. Una buena logística de transporte puede reducir el número de viajes al eliminar las vueltas en blanco o combinar cargas con destinos similares para evitar la subutilización de los camiones. El cambio de modo de carga de camiones a ferrocarril puede también reducir las emisiones de manera importante, en la medida en que el transporte ferroviario emplea 90 por ciento menos energía que el camionero.²⁹

Por último, las estrategias operativas para reducir las ineficiencias en los viajes pueden también reducir el uso de combustible y las emisiones. Las técnicas ecológicas de manejo — cambios de velocidad progresivos, moderación de la velocidad y la abstención de aceleraciones súbitas y paradas innecesarias— pueden resultar en ahorros de combustible de 5 por ciento o más.³⁰ Los sistemas de transporte inteligente (*Intelligent Transportation System*, ITS) pueden reducir las emisiones y el consumo de combustible al prevenir retrasos en los cruces fronterizos y puntos de verificación y al facultar a las empresas para dar seguimiento y vigilar el desempeño en el manejo.

ESTUDIO DE CASO: CORREDOR CIUDAD DE MÉXICO-MONTREAL

La selección de un corredor de transporte para el presente estudio fue resultado de diversos factores, como la disponibilidad de datos e investigaciones para el cálculo de las emisiones de GEI y otros contaminantes generados por el movimiento de mercancías. Son diversos los corredores de transporte y puertos de entrada importantes en América del Norte. Para fines del presente estudio, definimos “corredor de comercio y transporte” como las “rutas” principales designadas entre México, Estados Unidos y Canadá: en otras palabras, las principales rutas de transporte norte-sur (vías férreas o autopistas) que sustentan el movimiento de mercancías entre los tres países. Los puertos de entrada se refieren a las rutas de transporte este-oeste, como se identifican en las políticas y los programas respectivos de Canadá.³¹

En el presente estudio, la Interestatal 35 (I35), una ruta ya bien establecida e importante de movimientos de mercancía entre México y el sur y centro de Estados Unidos, se eligió como el brazo principal del corredor en estudio en el sur de Estados Unidos, vinculado en México por la autopista federal 85 a través de Monterrey hacia la Ciudad de México. Hacia el norte el corredor sale de la I35 en Dallas y sigue la I30 hacia la I40 a través de Little Rock (AR) y Memphis (TN) rumbo a Nashville, donde toma nuevamente hacia el norte en la I65 a Louisville (KY). Rodeando al noreste por la orilla de la línea Kentucky-Indiana en la I71, el corredor dobla hacia el norte en la I75 cerca de Cincinnati (OH) y continúa hacia Detroit (MI). Entra a Canadá en el cruce Detroit-Windsor (ON), sigue la autopista transcanadiense (401 en Ontario, 40 en Quebec) hasta Montreal, Quebec, tomando partes del corredor continental

²⁹ J. Davis, C. Facanha y J. Aamidor, *Greenhouse Gas Emissions from US Freight Sources: Using Activity Data to Interpret Trends and Reduce Uncertainty*, 2008 Transportation Research Record, 15 de noviembre de 2007.

³⁰ EPA de Estados Unidos, “SmartWay Transport Partnership”, *Drivers Training*, <<http://www.epa.gov/smartway/transport/documents/tech/driverstraining.pdf>>, mayo de 2009.

³¹ Canada's Gateways: <<http://www.canadagateways.gc.ca/index2.html>>.

Ontario-Quebec (**gráfica 1**). Seleccionamos un corredor ferroviario paralelo en lo posible al corredor de autopistas y, para formular la metodología del estudio se calculó el tonelaje de carga ferroviaria a partir del Marco de Evaluación del Transporte de Carga (*Freight Analysis Framework, FAF*) de la Administración Federal de Autopistas de Estados Unidos (*Federal Highway Administration, FHWA*). El corredor de autopistas y su equivalente ferroviario en paralelo representan una línea muy importante de transporte para el movimiento de mercancías en América del Norte. El **cuadro 2** presenta la información de las distancias a recorrer en cada país y a lo largo de toda la extensión del corredor, por modo de transporte.

Aunque los corredores de América del Norte no existen oficialmente, la ruta que seleccionamos como “corredor modelo” (en estudio) nos permite analizar, con base en la información sobre el flujo de mercancías, los efectos del movimiento de bienes por camión o ferrocarril en América del Norte. Los datos y la metodología empleados pueden aplicarse a otros corredores o puertos de entrada para mejorar la eficiencia del movimiento de mercancías y quizá disminuir los impactos en ellos.

Cuadro 2. Longitud del corredor en estudio, por país y modo

Modo	Canadá	Estados Unidos	México	Total
Carretero	531 millas (850 km)	1,624 millas (2,598 km)	693 millas (1,108 km)	2,847 millas (4,555 km)
Ferroviario	575 millas (920 km)	1,903 millas (3,045 km)	717 millas (1,147 km)	3,194 millas (5,110 km)

Enfoque del estudio y fuentes de datos

Para el análisis de la calidad del aire se consultaron las actuales fuentes de datos sobre movimiento camionero y ferroviario a lo largo del corredor de la Ciudad de México a Montreal, así como información de los cruces fronterizos. Los datos se recopilaron de fuentes diversas a lo largo del corredor. La principal fuente de información sobre movimiento de mercancías en camiones y trenes para este trabajo fue el Marco de Evaluación del Transporte de Carga (*Freight Analysis Framework, FAF* y *FAF2*). Los datos relativos al flujo camionero de proceden del ministerio de Transporte y de la Canadian National Railway Company en el caso de Canadá y de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y el Instituto Mexicano de Transporte (IMT) para México. También se usaron las siguientes fuentes de datos: Bureau of Transportation Statistics (BTS), National Transportation Atlas Database (NTAD), North American Transborder Freight Data (NATFD), y otras relativas a la carga y la actividad ferroviarias.

Gráfica 1. Corredores carretero y ferroviario, Ciudad de México-Montreal



Proyección azimutal (equivalente) de Lambert
Cartel realizado por la Comisión para la Cooperación Ambiental el 5 de enero de 2011

Para el análisis se eligieron dos años: 2010 como el año base y 2035 como escenario futuro, debido en buena parte a la disponibilidad de datos. Se optó por 2010 en lugar de los datos corrientes (2008-2009) porque la recesión económica pudo haber afectado el movimiento de mercancías.

Como punto de partida se identificaron las principales características de las metodologías para el cálculo de las emisiones camioneras y ferroviarias. En general, la cuantificación de los efectos de las actividades de carga en la calidad del aire requiere información sobre los movimientos de mercancías y las tasas de emisión por unidad de actividad; no obstante, los métodos de cálculo para cada modo de transporte necesitan datos diferentes. Más importante, los datos disponibles sobre el movimiento de mercancías y las tasas de emisión son notablemente más detallados y exactos para el sector camionero. El **cuadro 3** muestra los principales datos requeridos para el análisis de un corredor en lo relativo a movimiento de mercancías de los sectores camionero y ferroviario.

Cuadro 3. Datos necesarios para el análisis de los efectos del transporte de carga en la calidad del aire, por corredor

Sector camionero	Sector ferroviario
Actividad de carga <ul style="list-style-type: none"> - Kilómetros viajados por vehículo (KVV) en cada enlace calculadas a partir del volumen anual - Cantidad de vehículos y volúmenes anuales en los puertos de entrada - Características de la flota, incluida la edad de los vehículos, su distribución y participación en los KVV - Perfil de velocidad para camiones que cruzan en los puertos de entrada de Estados Unidos 	Actividad de carga <ul style="list-style-type: none"> - Flujo anual de mercancías entre cada par de estaciones de origen y destino en toneladas-kilómetro
Tasas de emisión <ul style="list-style-type: none"> - Tasas agregadas de emisiones de escape, con base en datos de los registros de los vehículos y el modelo MOBILE6.2 - Mediciones PEMS (<i>Portable Emissions Measurement System</i>) 	Tasas de emisión <ul style="list-style-type: none"> - Tasas de emisión de escapes con base en las tasas promedio nacionales

Los datos se agregaron para documentar los flujos de mercancías a lo largo del corredor de la Ciudad de México, México, a Montreal, Canadá. Para el segmento estadounidense se emplearon los datos del marco FAF de la FHWA sobre flujo de carga camionera y ferroviaria. La información de la red de autopistas y la red ferroviaria en el FAF está disponible como

conjunto de datos SIG (*Geographical Information System*). El marco FAF contiene dos conjuntos de datos principales:³²

- enlaces de autopistas y datos sobre camiones, y
- datos sobre origen y destino de las mercancías.

La versión actual del conjunto de enlaces de autopistas y datos sobre camiones del FAF se conoce como FAF² y comprende el cálculo sobre el flujo de mercancías en 2002, 2007, y de 2010 a 2035 en incrementos quinquenales; sin embargo, sólo tiene cálculos para el flujo camionero en autopistas para 2002 y 2035. El equipo de investigación obtuvo estos datos para el año base 2010 de versiones previas de la base de datos del FAF. La base de datos incluye información sobre la distancia y el volumen de carga, así como de los volúmenes de camiones sin carga para cada enlace de autopista específico, e información adicional como la capacidad por sección, la velocidad en los congestionamientos y los retrasos estimados para cada enlace de autopista. Los volúmenes y las distancias recorridas de los camiones se emplearon para calcular los KVV camioneros para unos 1,200 enlaces en Estados Unidos del corredor en estudio.

Los datos sobre movimiento ferroviario de mercancías entre las principales ciudades de Estados Unidos se obtuvieron del conjunto de datos FAF y FAF² para los datos de origen y destino de las mercancías. Esta base de datos incorpora cálculos sobre peso y valor de los bienes transportados por tipo de mercancía y modo de transporte entre las 114 zonas urbanas en Estados Unidos. Contiene también datos sobre el flujo de mercancías entre estas 114 zonas y 17 puertos de entrada internacionales de siete regiones comerciales mundiales.³³ Los datos sobre tonelaje y distancia ferroviaria se usaron para calcular las toneladas por kilómetro totales para cada sección del corredor ferroviario en Estados Unidos.³⁴

El Instituto de Transporte de Texas (*Texas Transportation Institute, TTI*) obtiene con regularidad datos sobre los registros de vehículos en el estado. Esta información se usa para realizar inventarios regionales de emisiones. Además del número de vehículos registrados por clase de vehículo, los datos incluyen el promedio de kilómetros recorridos por cada modelo y clase de vehículo. En la medida en que la mayoría de los volúmenes sin carga en el FAF se asocia con los servicios regionales y locales, puede suponerse que se trata de camiones pesados clase 6 con motores diésel (definidos como aquellos con una clasificación de peso bruto vehicular [*gross vehicle weight rating, GVWR*] de 19,501 a 26,000 libras). Todos los volúmenes de camiones de carga se consideran camiones diésel de servicio pesado clase 8b (GVWR de 33,000 libras y más). Se asume también que todos los camiones en el corredor en estudio comparten las características de los vehículos de Texas en términos de la composición de la flota. Empleando la base de datos del FAF se calcularon además las tasas de crecimiento anual de movimiento de mercancías de 2002 a 2010, con proyecciones de 2002 a 2035 para las actividades camionera y ferroviaria. Dichas tasas se emplearon posteriormente para calcular los volúmenes futuros para camión y carga ferroviaria de larga distancia tanto para el corredor canadiense como para el mexicano, suponiendo que los movimientos de mercancías

³² FHWA, FAF² Highway Link and Truck Data and Documentation: 2002 and 2035, Freight Analysis Framework, <http://www.ops.fhwa.dot.gov/freight/freight_analysis/faf/faf2_high.htm>.

³³ FHWA, FAF² Commodity Origin-Destination Data and Documentation: 2002-2035, Freight Analysis Framework, <http://www.ops.fhwa.dot.gov/freight/freight_analysis/faf/faf2_com.htm>.

³⁴ En la versión original de este informe, el TTI elaboró los mapas con base en datos de las emisiones expresadas en toneladas por milla; sin embargo, puesto que el documento está dirigido a un público trinacional, la CCA optó por convertir los datos a toneladas por kilómetro.

por camión y tren aumentan en el mismo grado a lo largo del corredor en estudio a través de Canadá, Estados Unidos y México.

Metodología para el cálculo de las emisiones

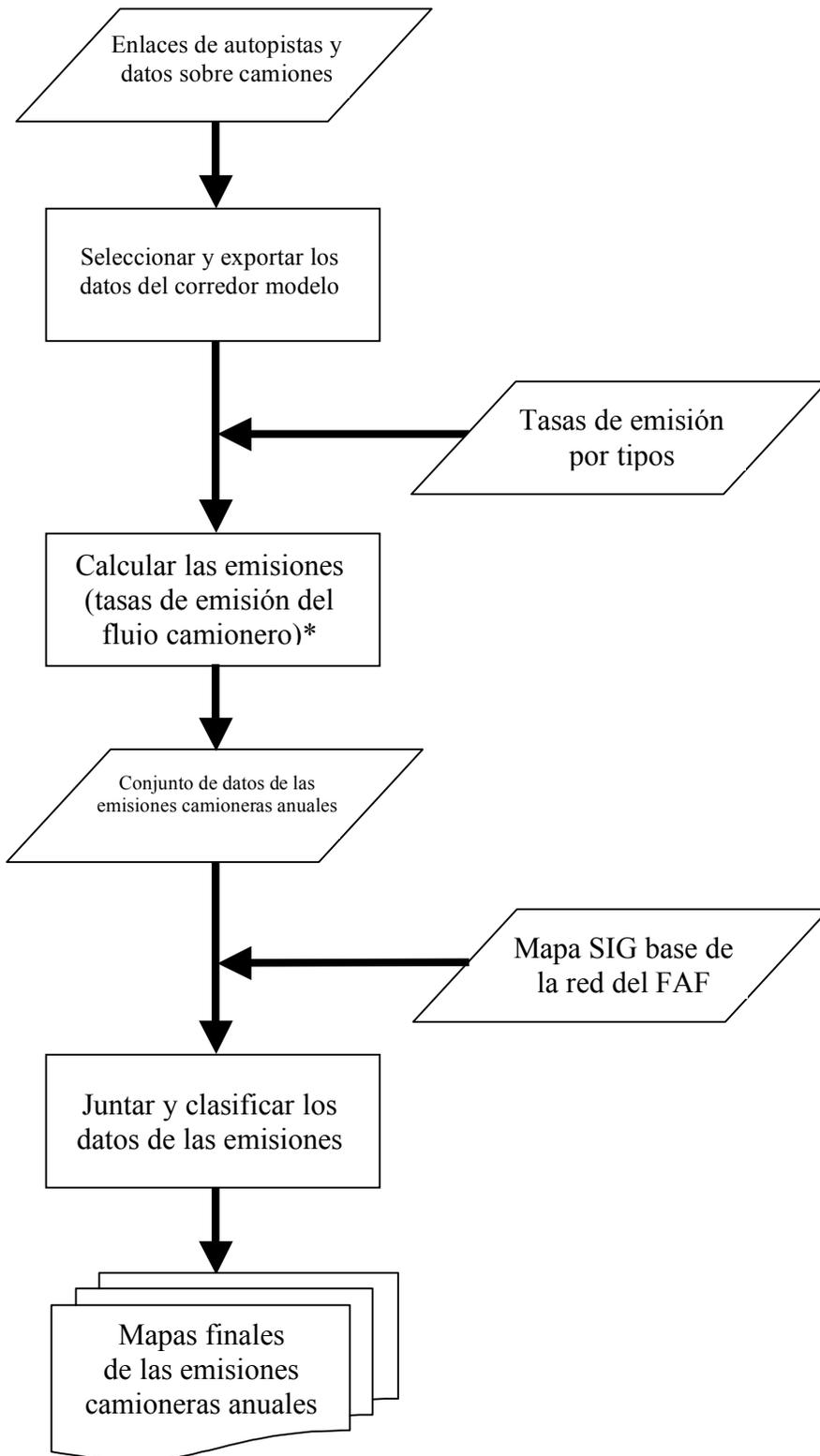
Cálculo de las emisiones de los camiones de carga

La **gráfica 2** presenta el diagrama de flujo que ilustra el proceso de cálculo de las emisiones camioneras a lo largo del corredor en estudio. Se empleó el modelo MOBILE6.2 de la EPA para obtener los factores de emisión correspondientes a los camiones de carga y no carga. El análisis incluyó emisiones de NO_x, hidrocarburos (HC) totales, CO, PM₁₀, y CO₂. Como el corredor cruza por zonas urbanas, para el análisis se asumieron dos velocidades de operación: 88 kilómetros por hora para las zonas urbanas y 105 para las rurales, con las consiguientes variaciones en las tasas de emisión. Aunque estos supuestos omiten de manera explícita el impacto tanto del funcionamiento al vacío (en ralentí) de los motores como de los congestionamientos locales, generan resultados en el grado de resolución necesario para el estudio del corredor. La clasificación de zonas urbanas o rurales se hizo conforme al conjunto de datos SIG del marco FAF. Para ambas velocidades se obtuvieron tasas de emisiones detalladas en gramos por milla para todos los años modelo, con los siguientes supuestos:

- años de análisis: 2010 y 2035;
- condiciones ambientales estándar, y
- todos los camiones del análisis emplean diésel ultrabajo en azufre (un máximo de 15 partes por millón).

Las tasas de emisión detalladas del modelo MOBILE6.2 se agregaron para obtener un conjunto de tasas de emisión promedio de la flota camionera en operación en el corredor Ciudad de México-Montreal. Las tasas de emisión se ponderaron con la distribución de la edad y el correspondiente cálculo de kilómetros anuales recorridos para conseguir las tasas de emisión agregadas, las cuales se aplicaron a los valores de carga KVV para obtener las emisiones totales por kilómetro recorrido para cada sección del corredor. Los resultados se transformaron posteriormente en formato SIG para su presentación cartográfica.

Gráfica 2. Análisis de las emisiones anuales del flujo camionero a lo largo del corredor Ciudad de México-Montreal



Cálculo de las emisiones de las locomotoras de carga

La **gráfica 3** presenta un diagrama de flujo que describe el proceso para calcular las emisiones ferroviarias a lo largo del corredor en estudio. Los datos de la actividad del movimiento ferroviario de mercancías por origen y destino del FAF² para Estados Unidos. Los volúmenes de las secciones canadiense y mexicana del corredor se calcularon con base en la información disponible y se calibraron con los datos totales de los cruces fronterizos. Los datos base empleados fueron los de la Canadian National Railway Company³⁵ para Canadá y los de la SCT con cálculos del IMT para México.

La sección de Estados Unidos incluye sólo las vías férreas clase I porque son las que conducen más de 90 por ciento de las toneladas-kilómetros y consumen casi 95 por ciento del total del combustible empleado.³⁶ Esta base de datos proporciona estimaciones sobre el tonelaje y el valor de los bienes transportados por tipo de mercancía y modo de transporte entre y en 114 zonas, así como hacia y desde siete regiones de comercio internacional. Los datos se obtuvieron para el año base (2010) y el del escenario futuro (2035) para todos los pares origen-destino a lo largo del corredor en estudio.

El método estándar para calcular las emisiones de las locomotoras se basa en el combustible consumido. Las tasas de emisión se expresan en gramos de contaminantes por galón de combustible quemado en el motor. Las normas de la EPA para locomotoras requieren una reducción de 59 por ciento en las emisiones de NO_x para los motores construidos en 2005 o años posteriores en comparación con los niveles previos a 2002. Las normas exigen también una baja de 40 por ciento de las emisiones de HC y PM respecto de los niveles previos a 2002. Las normas actuales de la EPA no incluyen disposiciones sobre las futuras emisiones de CO y CO₂, como se observa en sus correspondientes tasas futuras presentadas en el **cuadro 4**, donde se listan estas tasas de emisión. Al igual que en el caso de los camiones, los resultados se calcularon por sección del corredor y luego se convirtieron en formato SIG para su presentación cartográfica.

Cuadro 4. Factores de emisión promedio de la flotilla de locomotoras

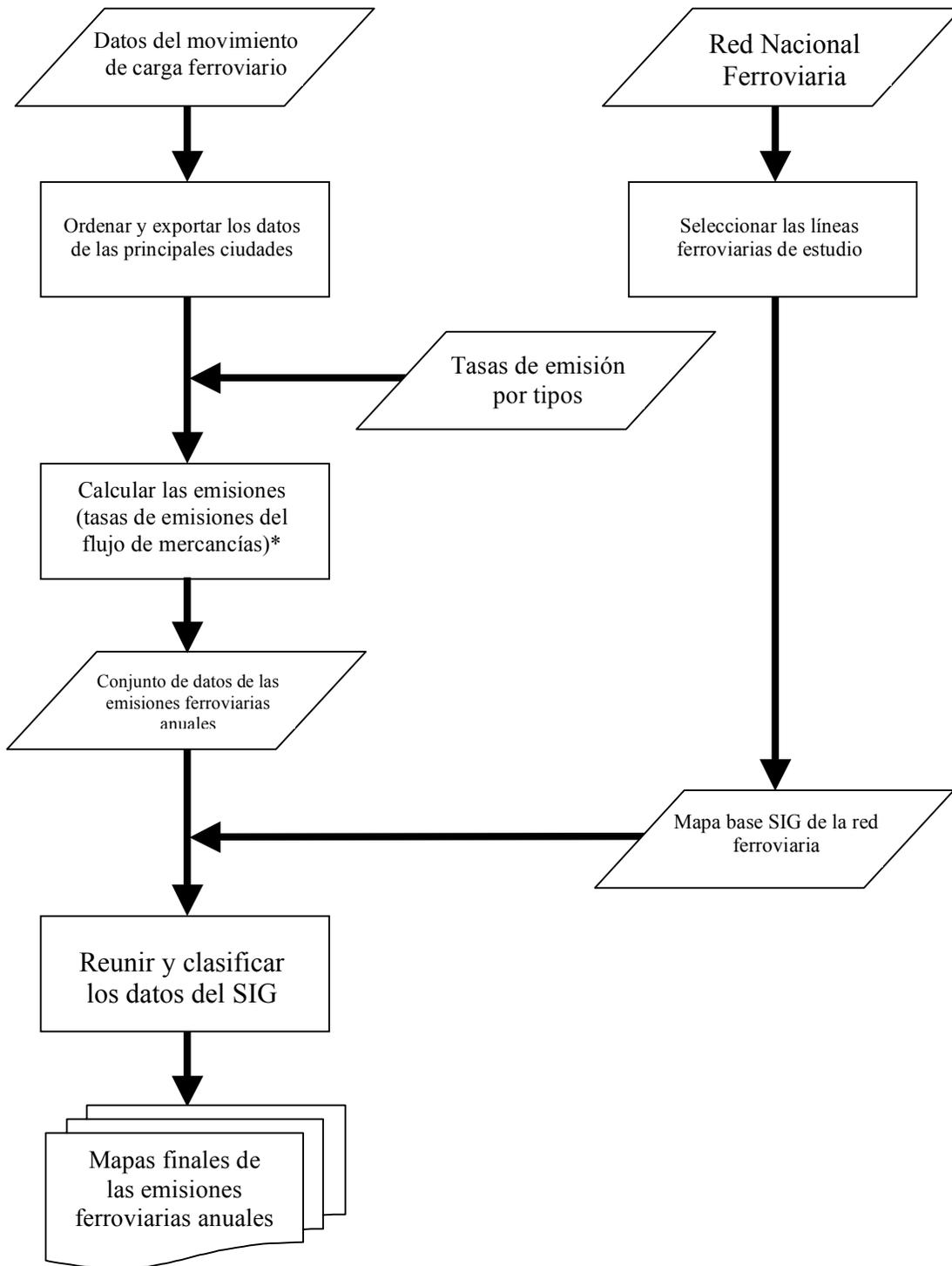
Factores de emisión (gramos por galón)					
Año	HC	CO	NO _x	PM	CO ₂
2010	9.2	27.4	163.7	5.7	10,084
2035	6.42	27.4	102.254	4.08	10,084

Nota: Las tasas de emisión del año base proceden de FHWA, *National Freight Transportation Trends and Emissions*, <http://www.fhwa.dot.gov/environment/freightaq/chapter2.htm#s2_3>. Para el año del escenario futuro (2035) se parte de que todos los motores de las locomotoras en servicio cumplirán con las normas citadas.

³⁵ Canadian National, *2009 Investor Fact Book*, <<http://www.cn.ca/documents/Investor-Factbook-current/DensityMap.pdf>>.

³⁶ Base de Datos de Transporte de Carga Transfronterizo de América del Norte (*North American Transborder Freight Database*, NATFD), <www.bts.gov>, 5 de agosto de 2007.

Gráfica 3. Proceso de análisis de las emisiones ferroviarias anuales en el corredor Ciudad de México-Montreal



Análisis de los resultados

Las **gráficas 4 a 13** muestran los resultados del análisis de emisiones de CO₂, CO, NO_x, HC totales y PM en formato cartográfico SIG. Los mapas muestran las características destacadas del corredor, incluidas las zonas urbanas. Los niveles de emisiones se indican mediante la coloración: los tonos más oscuros representan secciones con niveles más altos de emisiones. Los volúmenes de las emisiones de CO₂ son entre dos y tres veces mayores que los de otros contaminantes, por lo que para su presentación se utilizaron kilotoneladas/kilómetro en lugar de la unidad (toneladas/kilómetro) empleada para CO, NO_x, HC totales y PM.

El **cuadro 5** resume la cantidad total anual de contaminantes emitidos para el año base y el escenario futuro para la carga camionera y ferroviaria a lo largo del corredor. Estos resultados no incluyen las operaciones de patio transfronterizas en Laredo. Este remolque corto de la carga se aborda de manera explícita en la sección siguiente. Los resultados del caso base indican que los camiones emiten cantidades mayores de todos los contaminantes, pero que la participación relativa de las emisiones ferrocarrileras de algunos contaminantes (NO_x y PM, por ejemplo) aumentará en el caso futuro. El CO₂, sin embargo, puede ser una excepción. Los camiones emiten más de 75 veces más CO₂ que las locomotoras de carga en 2010 (el caso base). En 2035, en tanto, la contribución total de CO₂ de ambos modos de transporte será mayor que en el año base, con incremento en mayor proporción de las emisiones camioneras: se prevé que en 2035 emitan más de 110 veces el total de total CO₂ que el de las locomotoras de carga. Puesto que el CO₂ es resultado directo de la combustión, el consumo de combustible seguirá la misma tendencia. Debido a limitaciones del conjunto de datos, no está claro qué proporción del incremento relativo de las emisiones camioneras y de la disminución relativa de las emisiones ferrocarrileras puede atribuirse a cambios en el modo de transporte, a mejoras tecnológicas o a un incremento global de la carga, respectivamente. Sin duda, investigaciones futuras más detalladas nos permitirán aclarar estas cuestiones.

Los resultados en general indican que las estrategias de reducción de emisiones en el sector camionero producirán una disminución considerable de ciertos contaminantes atmosféricos de criterio (CO, NO_x, y PM). En contraste, las emisiones ferrocarrileras aumentan en general en el caso futuro. Ello se debe a normas menos estrictas previstas para las emisiones de las locomotoras en comparación con las de los camiones, así como al largo plazo para la instrumentación y el cumplimiento de dichas normas.

Cuadro 5. Monto anual total de las emisiones debidas al movimiento de mercancías en el corredor Ciudad de México-Montreal

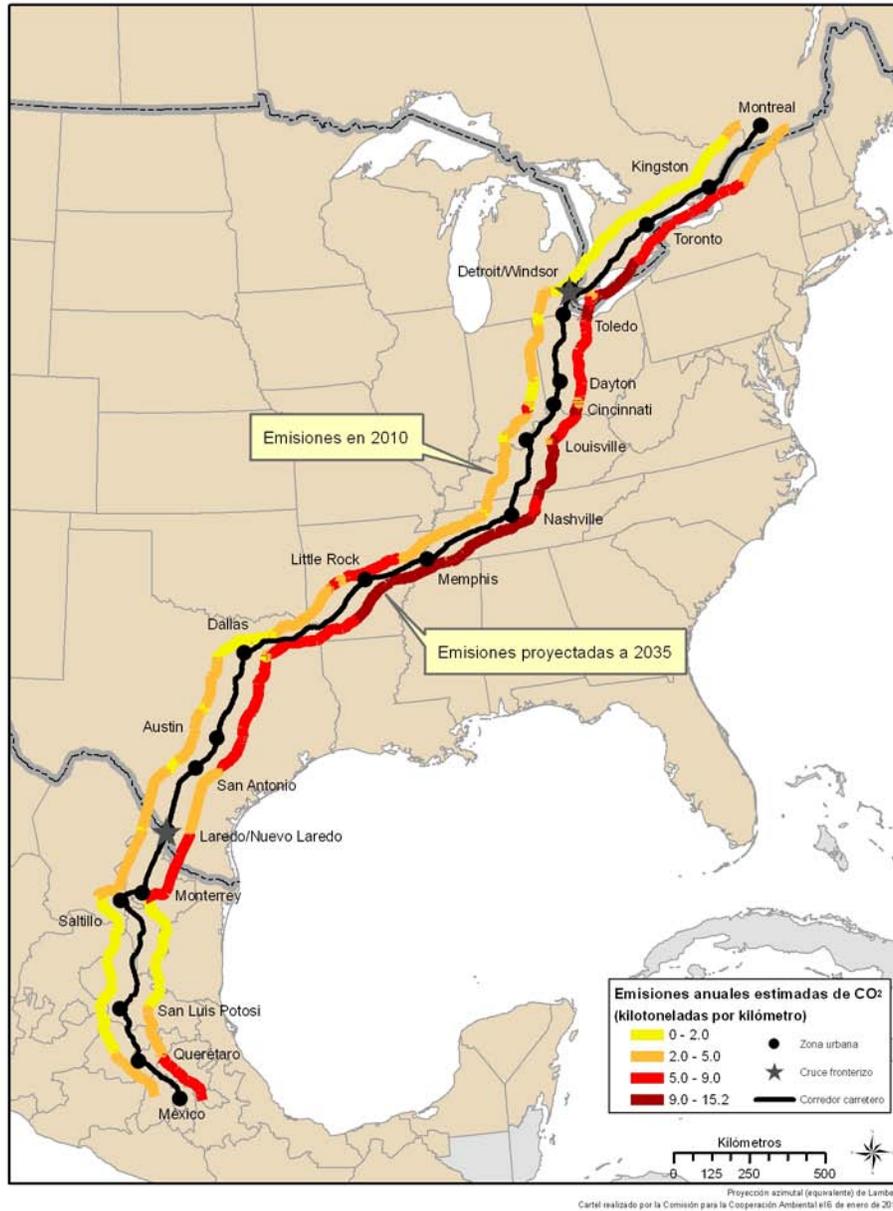
	Año	Emisiones anuales				
		CO ₂ (kilotoneladas, kt)	CO (toneladas)	NO _x (toneladas)	HC totales ³⁷ (toneladas)	PM (toneladas)
Camiones	2010	13,508	10,746	76,733	2,231	713
	2035	32,218	4,209	17,015	3,730	217
Trenes	2010	177	480	2,866	161	100
	2035	278	756	2,821	177	113

Nota: Las tasas base de emisiones anuales proceden de FHWA National Freight Transportation Trends and Emissions <http://www.fhwa.dot.gov/environment/freightaq/chapter2.htm#s2_3>. Para el escenario futuro (2035) se parte de que todos los motores de las locomotoras cumplirán con las normas citadas.

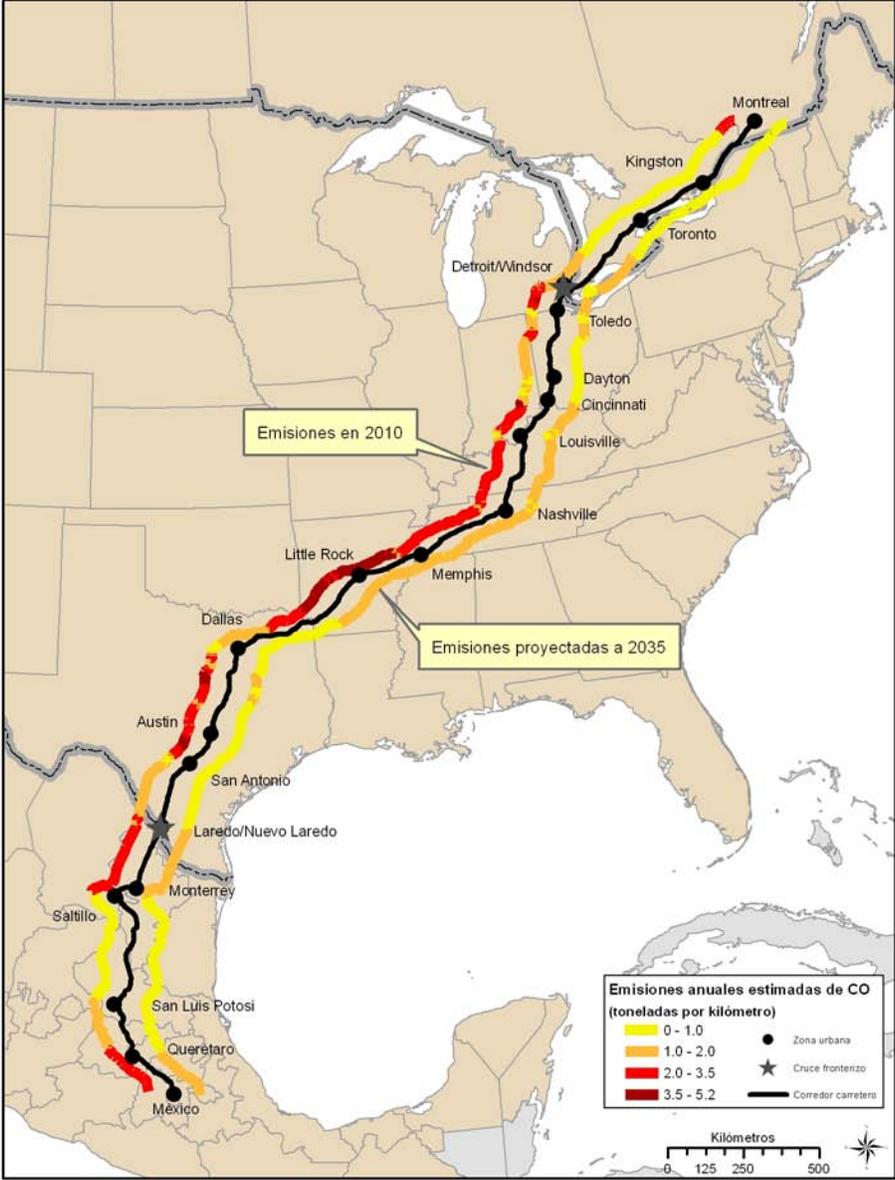
Cabe señalar que los cálculos futuros sobre emisiones de contaminantes atmosféricos de criterio dependerán en gran medida de las normas futuras para los motores, las tecnologías de reducción de emisiones y su penetración en el mercado. Se prevé que el diésel siga siendo la principal fuente de energía para las actividades de carga camionera y ferroviaria y que los avances tecnológicos mejorarán marginalmente la eficiencia del combustible, según se modela en MOBILE 6; por ello, las estimaciones futuras sobre emisiones de CO₂ se consideran razonablemente confiables y exactas.

³⁷ Para ser congruentes con el análisis de los cruces fronterizos, se registran los hidrocarburos totales (HC totales) en lugar de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV). Según la EPA, 95 por ciento del total de los COV provenientes de motores diésel lo constituyen emisiones de HC totales. Véase <<http://www.epa.gov/OMS/models/nonrdmdl/nonrdmdl2005/420r05015.pdf>>.

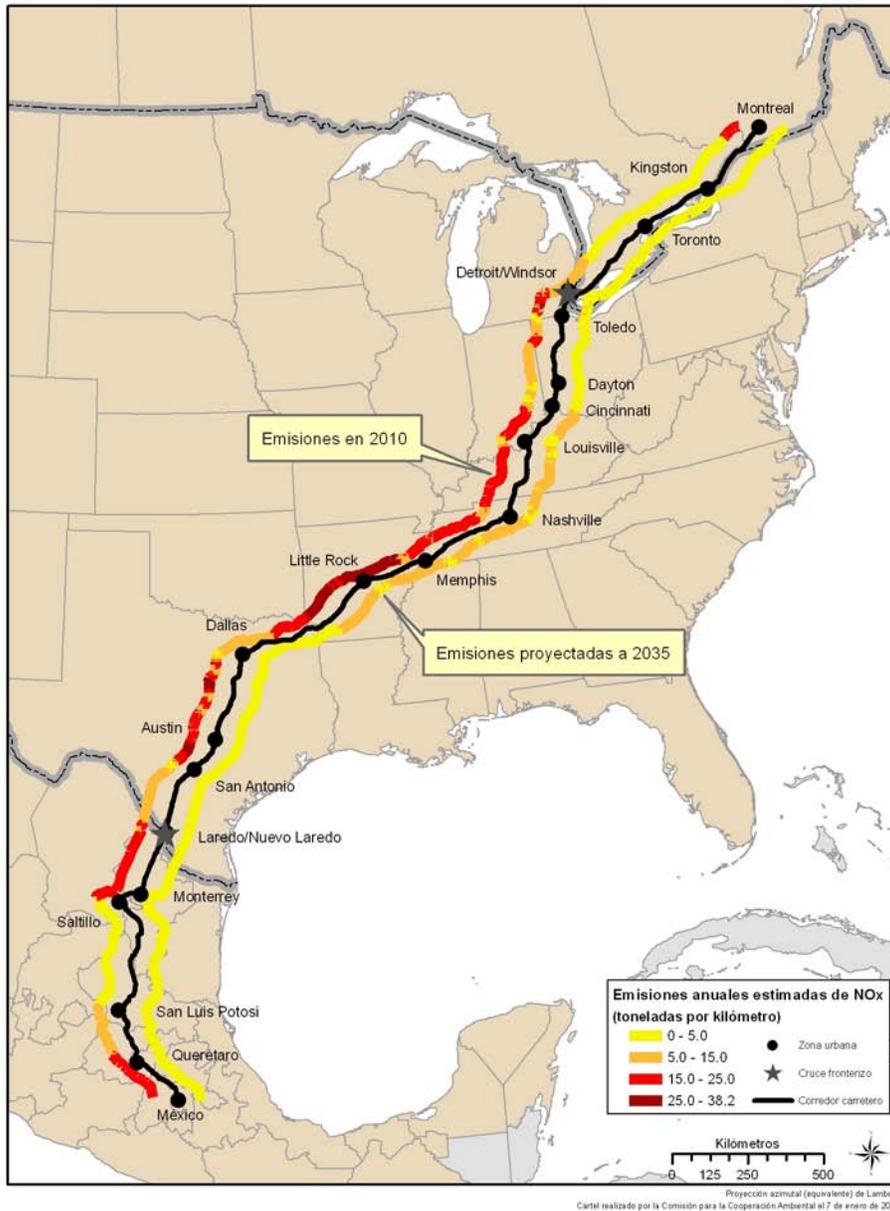
Gráfica 4. Emisiones estimadas de CO₂ del transporte carretero en el corredor, 2010 y 2035



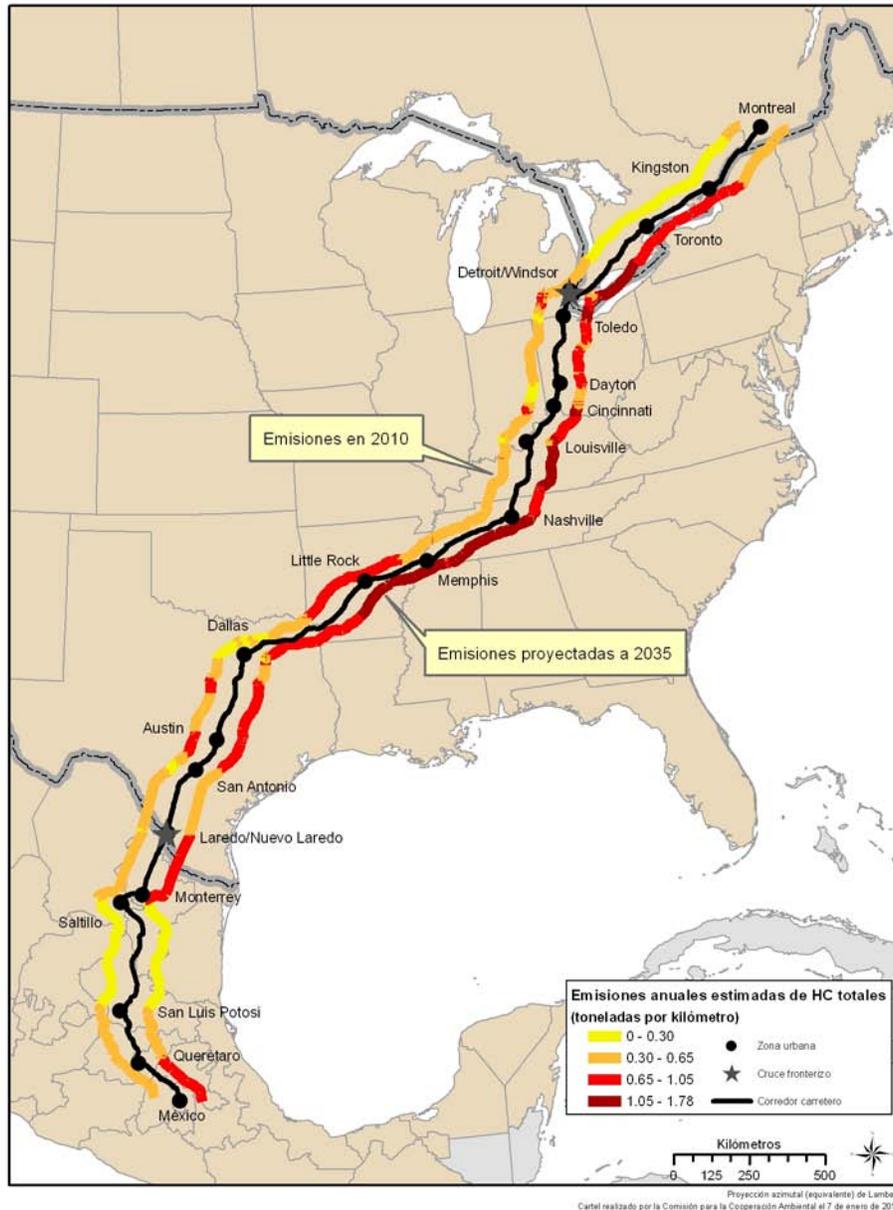
Gráfica 5. Emisiones estimadas de CO del transporte carretero en el corredor, 2010 y 2035



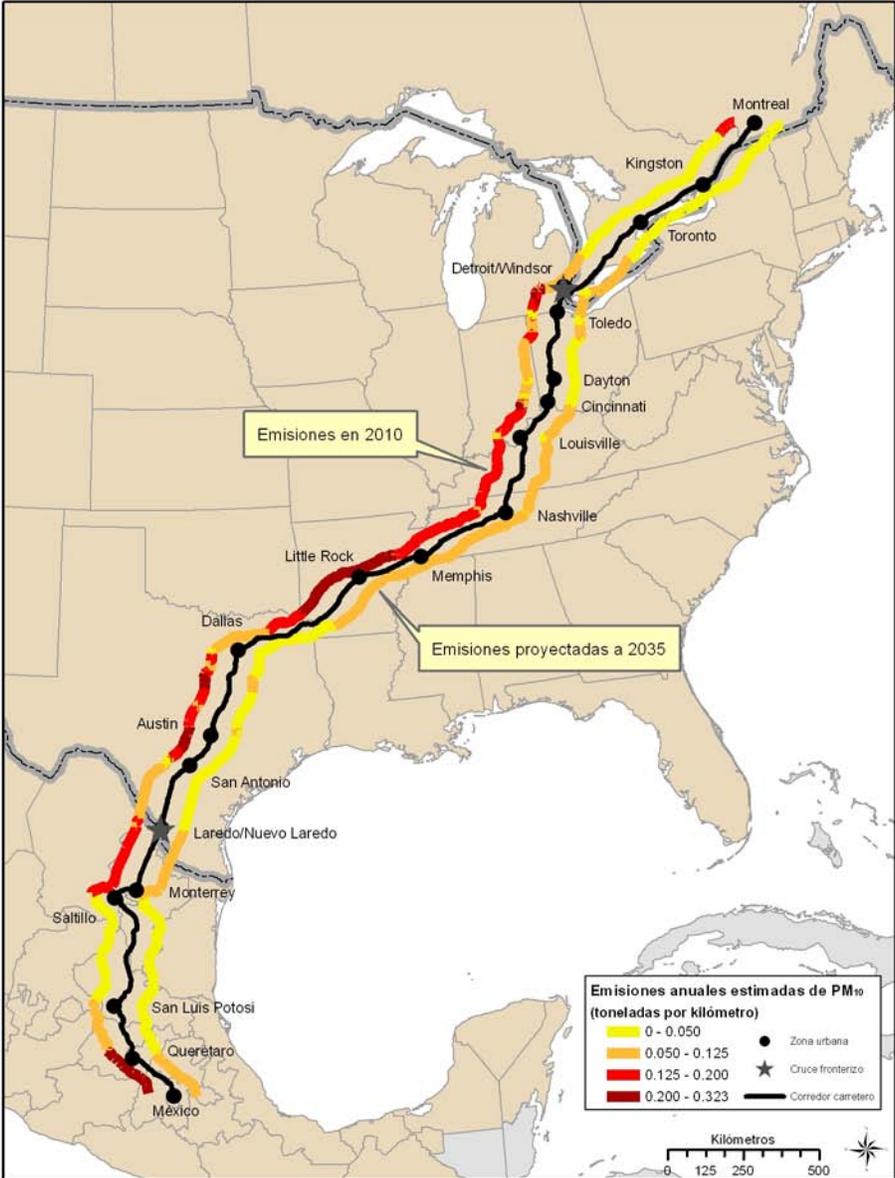
Gráfica 6. Emisiones estimadas de NO_x del transporte carretero en el corredor, 2010 y 2035



Gráfica 7. Emisiones estimadas de hidrocarburos totales (HC totales) del transporte carretero en el corredor, 2010 y 2035

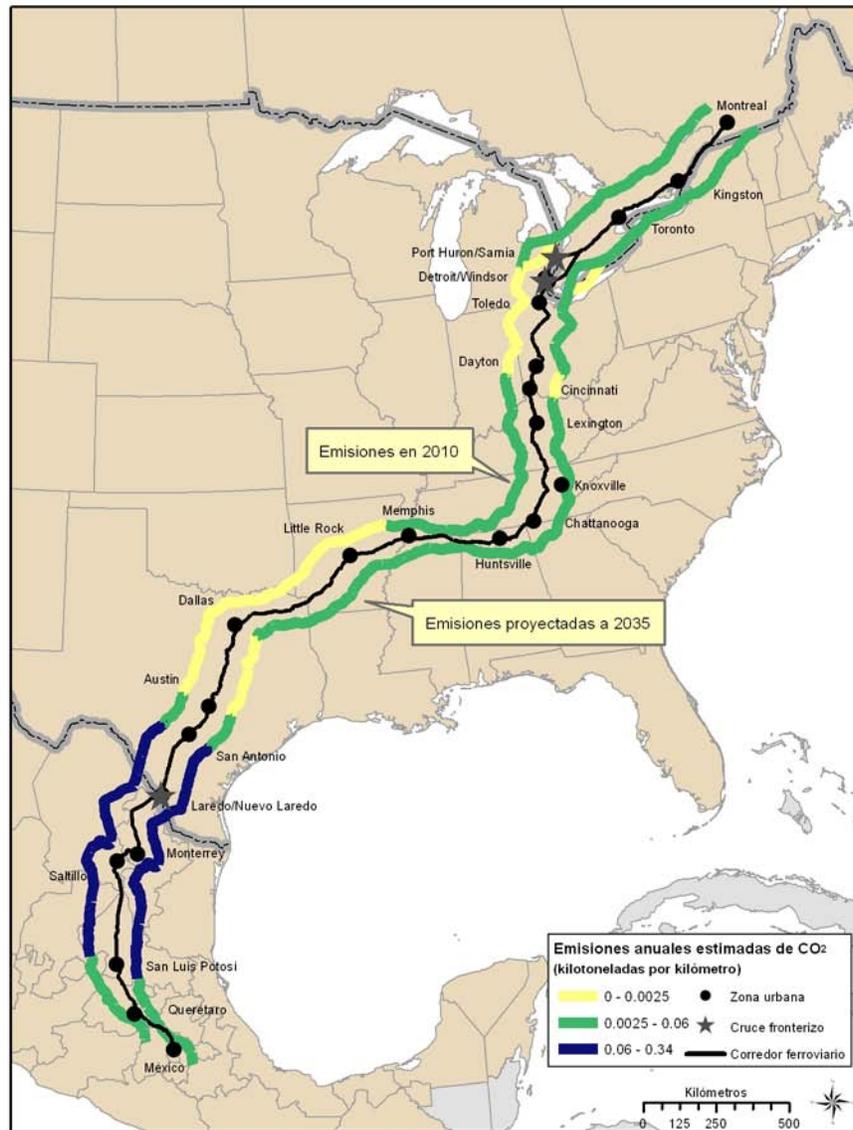


Gráfica 8. Emisiones estimadas de PM₁₀ del transporte carretero en el corredor, 2010 y 2035



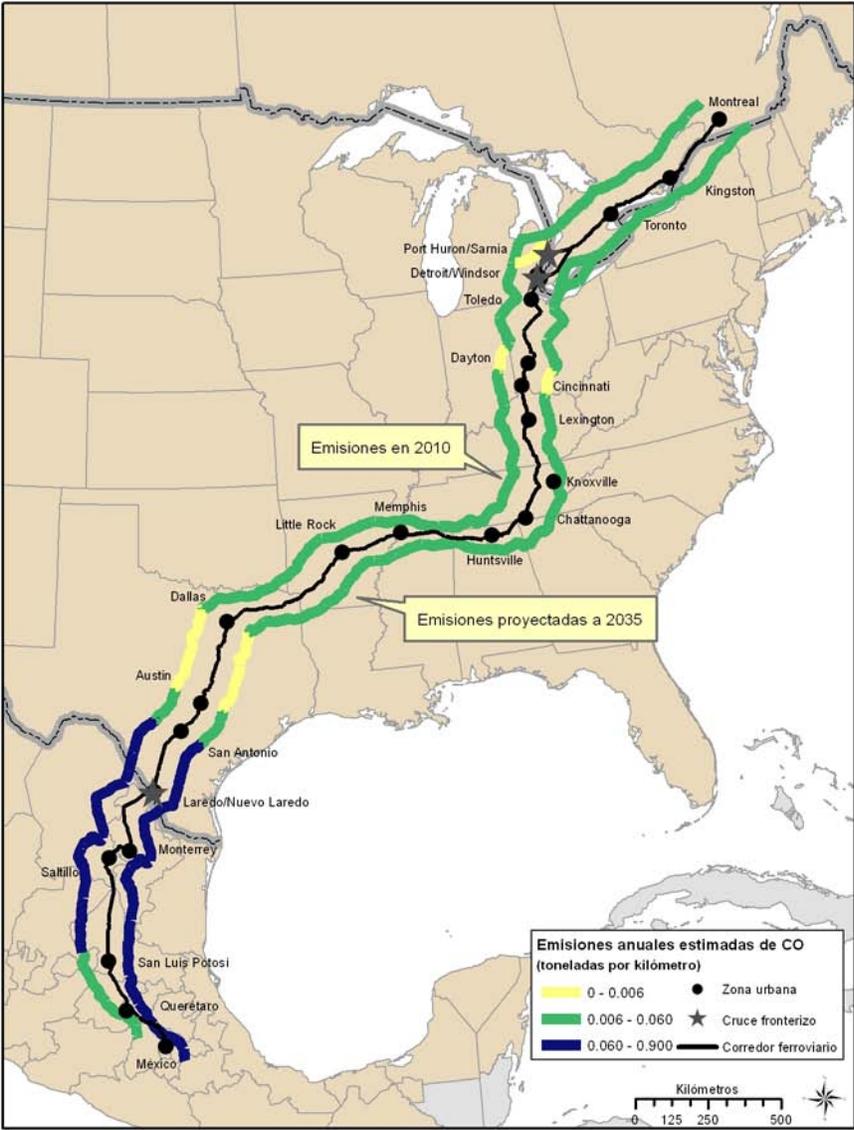
Proyección azimutal (equivalente) de Lambert
 Cartel realizado por la Comisión para la Cooperación Ambiental el 7 de enero de 2011

Gráfica 9. Emisiones estimadas de CO₂ del transporte ferroviario en el corredor, 2010 y 2035



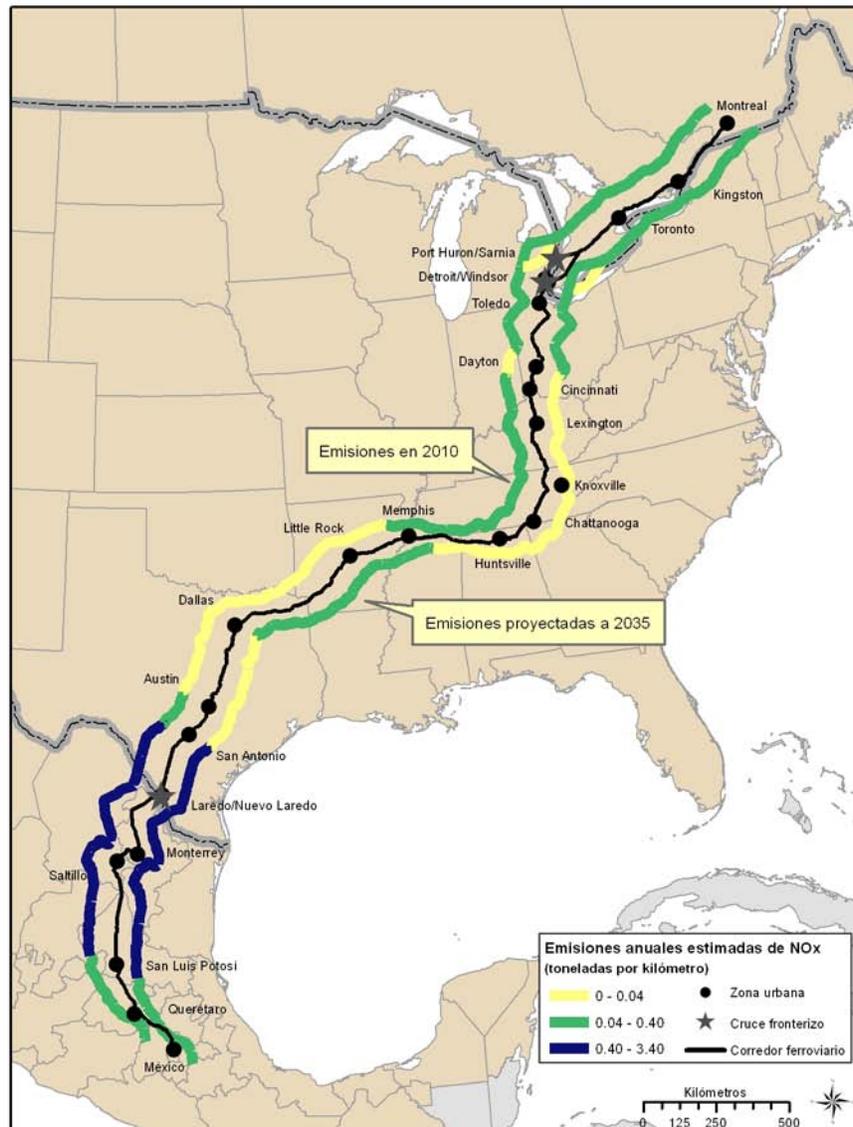
Proyección azimutal (equivalente) de Lambert
Cartel realizado por la Comisión para la Cooperación Ambiental el 24 de noviembre de 2010.

Gráfica 10. Emisiones estimadas de CO del transporte ferroviario en el corredor, 2010 y 2035



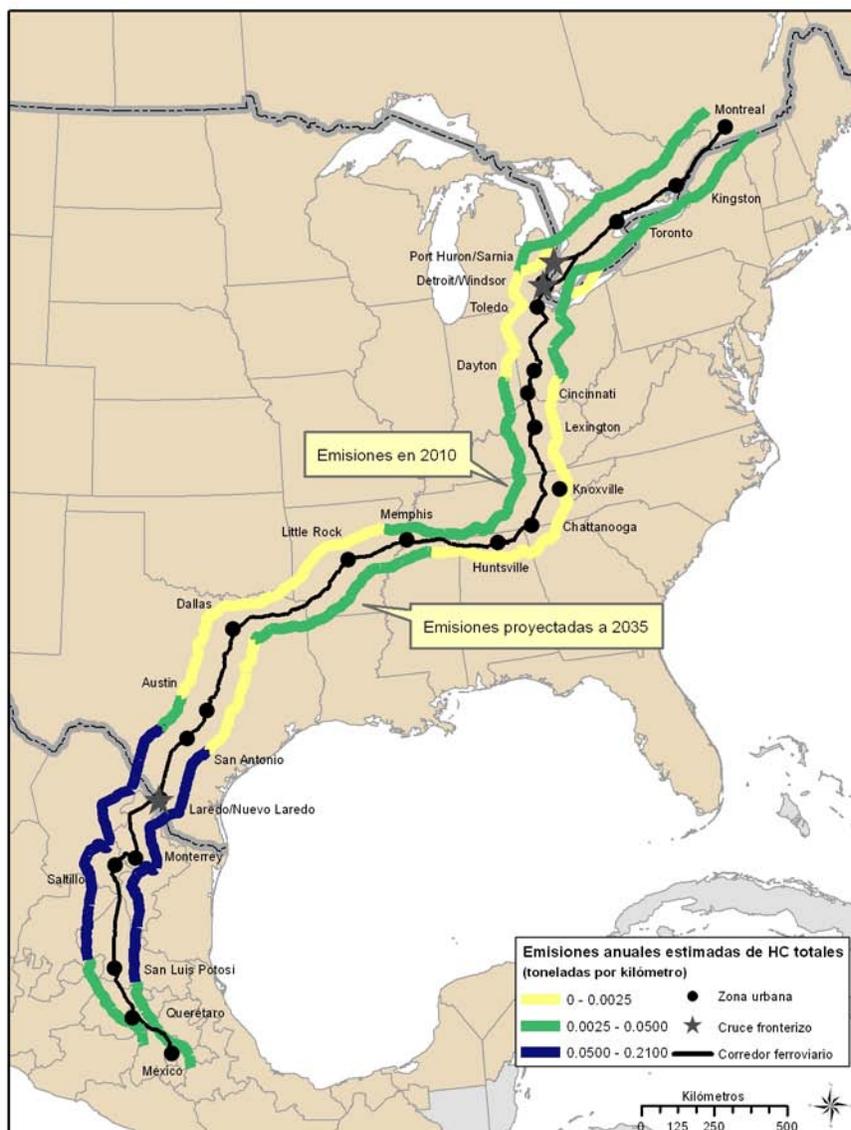
Proyección azimutal (equivalente) de Lambert
 Cartel realizado por la Comisión para la Cooperación Ambiental el 10 de enero de 2011

Gráfica 11. Emisiones estimadas de NO_x del transporte ferroviario en el corredor, 2010 y 2035



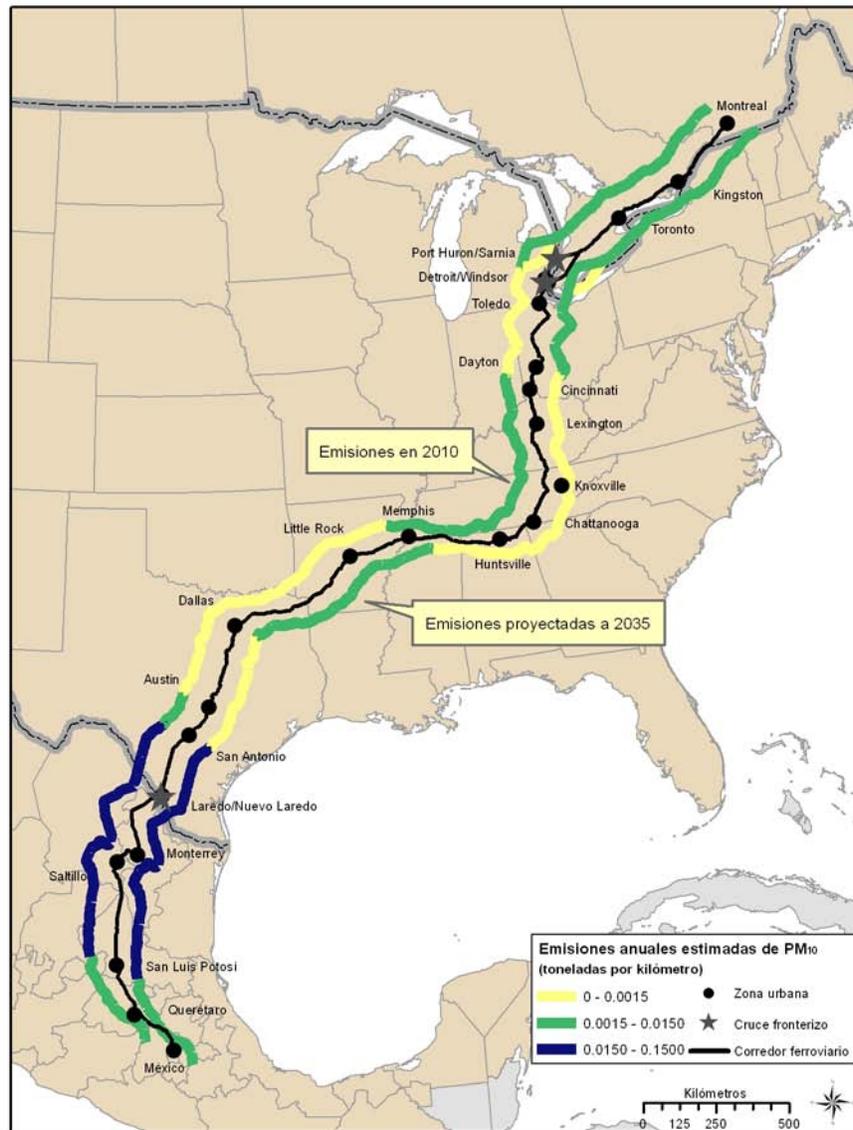
Proyección azimutal (equivalente) de Lambert
Cartel realizado por la Comisión para la Cooperación Ambiental el 11 de enero de 2011

Gráfica 12. Emisiones estimadas de hidrocarburos totales (HC totales) del transporte ferroviario en el corredor, 2010 y 2035



Proyección azimutal (equivalente) de Lambert
 Cartel realizado por la Comisión para la Cooperación Ambiental el 11 de enero de 2011

Gráfica 13. Emisiones estimadas de PM₁₀ del transporte ferroviario en el corredor, 2010 y 2035



Proyección azimutal (equivalente) de Lambert
 Cartel realizado por la Comisión para la Cooperación Ambiental el 11 de enero de 2011

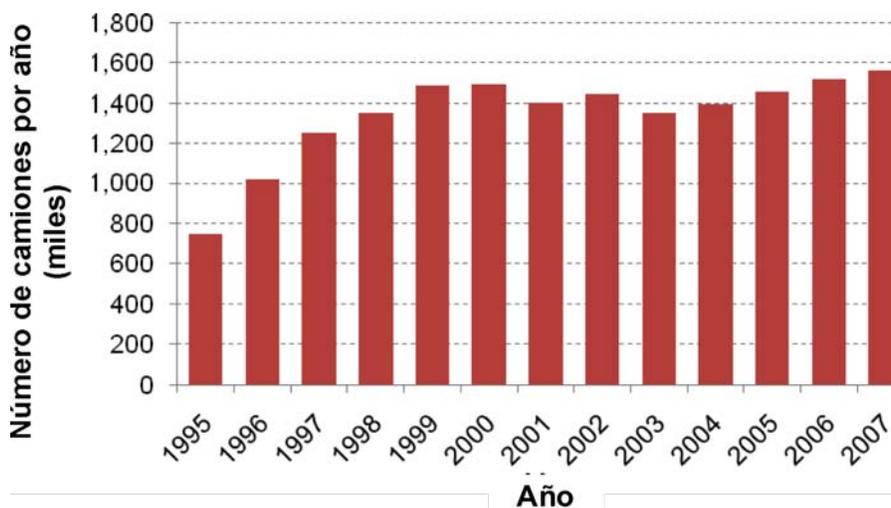
Cálculo de las emisiones generadas por el transporte de carga en los cruces fronterizos

El movimiento de mercancías en distancias cortas se concentra principalmente en los cruces fronterizos y se denomina acarreo o arrastre de remolque. En términos del corredor en estudio, las emisiones de esta actividad en el cruce fronterizo de Laredo son de gran importancia porque se trata de uno de los cruces principales, y los pocos disponibles para los camiones mexicanos que ingresan a Estados Unidos generan arrastre adicional y movimiento de camiones vacíos en esos cruces. Aunque también hay congestión en la frontera Estados Unidos-Canadá, los de la frontera con México son mucho mayores, por lo que este apartado sólo se ocupa de esta última frontera. Sin embargo, la metodología es aplicable a todos los cruces fronterizos.

La mayoría de los cruces por carretera de México a Estados Unidos entraña camiones de arrastre mexicanos. En la actualidad, la actividad de los operadores camioneros mexicanos está confinada a una estrecha zona comercial que por lo general se extiende hasta 32 kilómetros allende la frontera. Por ello, los embarques terrestres mexicanos a Estados Unidos deben usar unidades de arrastre o transferencia. Los tractores o camiones de arrastre llevan los tráileres del lado mexicano de la frontera a la zona comercial estadounidense, donde se transfieren a un transportista de esa nacionalidad para que haga la entrega en el destino final.

Los datos sobre la cantidad total de camiones que cruzan anualmente a Estados Unidos en cada puerto de entrada proceden del sitio web de la Oficina de Estadísticas del Transporte (*Bureau of Transportation Statistics, BTS* [véase la nota 21]). La **gráfica 14** presenta los datos correspondientes al puerto de entrada en Laredo. La información sobre el tráfico más reciente para un año completo, 2008, muestra un decremento del volumen camionero respecto de 2007. En los dos primeros meses de 2009 la tendencia se mantuvo debido a la recesión económica en curso. Se da por sentado que el volumen de actividad camionera en el año base de 2010 recuperará, más o menos, el nivel de 2007, por lo que en el cálculo se usaron los volúmenes de este último año. El volumen camionero para 2035 se estimó aplicando la tasa de crecimiento del marco FAF² de la FHWA entre 2010 y 2035.

Gráfica 14. Volúmenes anuales de cruces camioneros fronterizos a Estados Unidos en Laredo, Texas

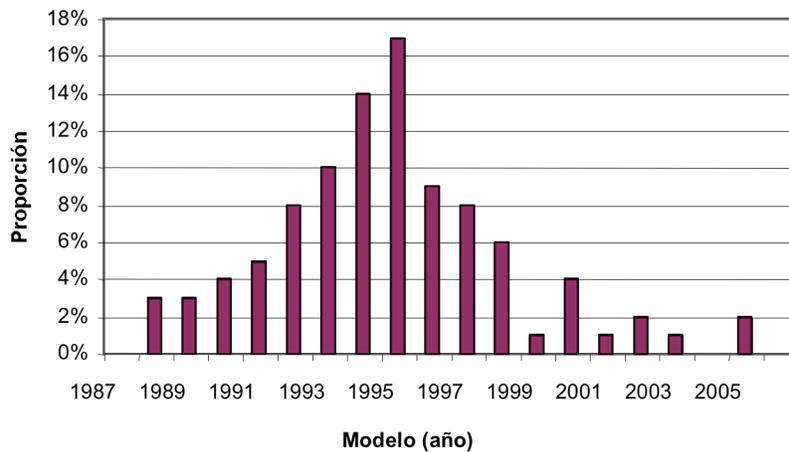


Fuente: Oficina de Estadísticas del Transporte de Estados Unidos.

Los datos de las emisiones estimadas y la metodología empleada para el presente trabajo proceden del estudio del TTI de 2007 sobre la calidad del aire en el cruce fronterizo Estados Unidos-México. Dicha metodología se desarrolló a partir de los datos recogidos para dos estudios del TTI sobre el sector camionero mexicano y en general sobre el perfil de las emisiones camioneras. En el primero de esos estudios se eligió una muestra de 10 camiones mexicanos. Cada unidad se sometió a ciclos de operación de larga distancia y en transferencias cortas remolcando un tráiler de peso específico. Se recogieron datos empleando equipo de mediciones PEMS. En el segundo estudio se realizaron pruebas de emisiones a altas velocidades en la pista del Centro de Investigación Pecos (*Pecos Research and Testing Center, RTC*) cerca de Pecos, Texas. Los datos sobre las emisiones de estas pruebas se usaron para elaborar una serie de modelos de emisiones instantáneas, segundo por segundo.

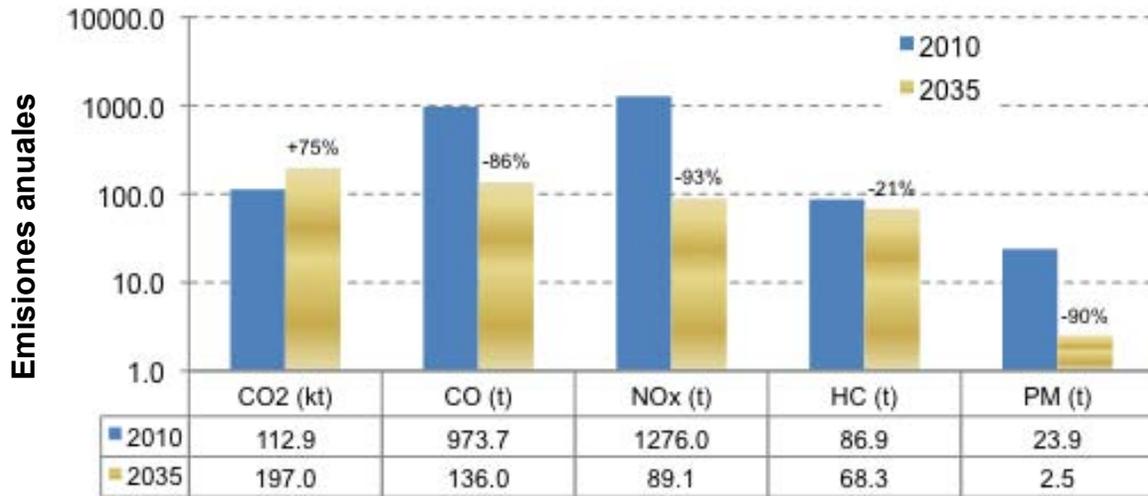
El método analítico para calcular el impacto total en la calidad del aire de los camiones mexicanos se elaboró combinando estos modelos de emisiones segundo por segundo con los datos de las emisiones de los camiones mexicanos. La metodología desarrollada mezcló en un enfoque sistemático los datos sobre las emisiones observadas en los camiones muestra, los resultados de los modelos de emisiones segundo por segundo, los datos sobre el tráfico de camiones comerciales, los patrones de manejo por actividad de una muestra del conjunto de datos GPS y la distribución por edad o modelo de los camiones. La **gráfica 15** muestra la distribución por modelo (año) de los camiones de arrastre mexicanos en el puerto de entrada de Laredo (a 2006).

Gráfica 15. Distribución por modelo (año) de los camiones de arrastre en Laredo, según estudio del TTI realizado en 2006



Las tasas de emisión para 2035 se modificaron a fin de reflejar los cambios proyectados en las normas de emisiones para los camiones de carga pasada. Se dio por sentado que el cambio porcentual en las emisiones de los camiones mexicanos sería el mismo que el de los estadounidenses debido a las tecnologías más avanzadas de los motores y a la modernización de flota. Con el volumen estimado para 2010 y 2035, se aplicó ese supuesto para calcular el impacto total en la calidad del aire (**gráfica 16**) de los camiones de arrastre mexicanos que entran en la zona de acarreo en el puerto de entrada de Laredo.

Gráfica 16. Emisiones anuales en el puerto de entrada de Laredo



La gráfica muestra que el cruce de Laredo es una fuente importante de emisiones, en particular frente a las generadas por el movimiento de carga a lo largo de todo el corredor. Cabe señalar que estas emisiones se originan en buena medida por retrasos y congestionamientos en la frontera y no guardan mucha relación con el movimiento real de mercancías. Por ello, la mejoría en los procesos de cruce fronterizo y en infraestructura pueden tener un efecto significativo en las emisiones atribuidas al movimiento de mercancías en el corredor.

PROBLEMAS, RETOS Y OPORTUNIDADES

A partir de los hallazgos de los apartados previos, en esta parte se considera el alcance del análisis, los datos necesarios y sus fuentes relativos a la determinación de los efectos en la calidad del aire y el cambio climático del movimiento de mercancías a lo largo de los principales corredores de transporte, así como las estrategias de mitigación de dichos impactos.

Alcance del análisis y contaminantes atmosféricos

El presente estudio se ha centrado en las emisiones de escapes del movimiento camionero y ferroviario de mercancías a lo largo de un corredor. Entre los contaminantes tomados en cuenta en este trabajo figuran CO₂, CO, NO_x, HC totales y PM. No se cubren las emisiones de sustancias tóxicas atmosféricas provenientes de fuentes móviles (*mobile source air toxic, MSAT*) debido a que los datos actuales sobre dichas sustancias tienen un elevado grado de incertidumbre. Sin embargo, cada vez se concede más importancia a las MSAT, en la medida que se efectúan más estudios sobre sus efectos en la salud y se mejoran las metodologías para su medición.

El **cuadro 6** muestra los diversos niveles geográficos de los efectos y la exactitud de los datos para cada contaminante. El CO₂ es el principal GEI que contribuye al cambio climático y, por tanto, tiene un impacto mundial. Las emisiones de HC totales, NO_x (principalmente NO) y CO son precursoras del ozono troposférico, que constituye un problema regional. Las emisiones

de CO, NO_x (principalmente NO₂), PM y MSAT tienen efectos negativos en la salud y, por lo tanto, consecuencias locales significativas en la población expuesta.

Cuadro 6. Alcance de los efectos y precisión de los datos sobre contaminantes atmosféricos del transporte

Contaminante	Zona de impacto	Precisión de los datos
CO ₂	Mundial	Promedio o más alta
CO	Regional, local	Promedio
NO _x	Regional, local (NO ₂)	Promedio
HC totales	Regional	Promedio
PM	Local	Por debajo del promedio
MSAT	Local	Poca

Metodologías de estimación

El CO₂, un derivado directo de la quema de combustibles fósiles, puede calcularse fácilmente a partir de la cantidad de combustible consumido si se aplican los factores de conversión pertinentes. Los datos sobre consumo de combustible por lo general se recopilan y registran por estado y en el ámbito federal con fines fiscales. Estos datos son razonablemente precisos y constituyen una fuente confiable para analizar las emisiones de CO₂ en las entidades federativas y en escala nacional. Un análisis de mayor detalle, sin embargo (similar al que se lleva a cabo en este estudio de caso analítico), requiere la estimación del consumo de combustible de vehículos y equipo específicos del estudio. Ello es similar a la estimación de otras emisiones contaminantes gaseosas (CO, HC totales y NO_x). Para este tipo de análisis, las tasas de emisión-distancia (gramos por milla) se aplican a los datos de la actividad de la flota (KVV, por ejemplo) para estimar el impacto total en la calidad del aire. La EPA elabora las tasas de emisión a partir de los datos de las emisiones recopilados de una muestra limitada de vehículos representativos de los diversos tipos, fabricantes y modelos. Estas tasas son reflejo de las características promedio de la flota nacional.

La incertidumbre tanto en la medición de las emisiones de partículas suspendidas (PM) como en la evaluación de los efectos que éstas tienen en la salud ha sido siempre mayor que en lo que respecta a los contaminantes atmosféricos de criterio. Las actuales tasas de emisión se basan en mediciones de los sistemas de filtrado. Los métodos para medir las emisiones de PM mejoraron de manera significativa en la década previa y se espera disponer de datos de mejor calidad para modelos futuros de estimación. La misma problemática se aplica a las emisiones de MSAT, cuya relativamente minúscula participación en las emisiones de escape hace que los datos disponibles tengan un alto grado de incertidumbre.

El análisis efectuado en este estudio se centra en las emisiones de los escapes, las cuales constituyen la mayor parte de las emisiones camioneras en un corredor de transporte de carga. Aunque otros modos de operación, como el motor encendido durante reposos prolongados y actividades de cruce fronterizo, producen a veces emisiones significativas, su impacto se presenta básicamente en el ámbito de la salud y el medio ambiente local, más que en el corredor. Los métodos empleados en esta investigación ofrecen sólo los efectos directos de las emisiones generadas por el movimiento de mercancías y no toman en cuenta el ciclo de vida del petróleo ni las implicaciones en términos de la energía y las emisiones derivadas del

proceso de elaboración del combustible, “del pozo a la estación de servicio”. Estos tipos de análisis requieren gran cantidad de datos adicionales que no son tan precisos ni están fácilmente disponibles (mediciones directas de las emisiones, por ejemplo).

Los datos necesarios y sus fuentes

El proceso para analizar los impactos ambientales del movimiento de mercancías a lo largo de los corredores sacó a la luz diversos puntos en los que la información necesaria tiene un alto grado de incertidumbre o incluso no existe. Es importante corregir estas deficiencias en la medida en que ganan importancia los problemas ambientales relacionadas con el comercio. Más adelante se analizan cuatro puntos específicos, junto con varios ejemplos de medios para mejorar la recopilación de información y el monitoreo ambiental.

Fuentes de datos

Las fuentes de datos disponibles pueden clasificarse, en general, como públicas, que son recogidas y manejadas por los gobiernos locales, estatales y federales, y privadas, es decir elaboradas y mantenidas por empresas privadas. Las bases de datos privadas suelen combinar conjuntos de datos públicos con los datos adicionales obtenidos por las compañías de transporte. Los datos privados son con frecuencia exclusivos y, por tanto, su obtención resulta costosa. Este tipo de datos está más allá del alcance del tipo de análisis efectuado en la presente investigación.

Se encontró que las bases de datos del FAF y de la Oficina de Estadísticas del Transporte (*Bureau of Transportation Statistics*, BTS) fueron las fuentes de datos más confiables para el análisis realizado en el presente estudio. En concreto, el FAF y la Base de Datos del Atlas Nacional del Transporte de la FHWA y los datos de entrada de carga de la BTS brindaron la información necesaria con un nivel de precisión adecuado.

Al no existir una sola base de datos del transporte de carga para los tres países de América del Norte con el nivel de información requerido para el análisis de los corredores, es necesario identificar las fuentes de datos de cada país. Fue difícil obtener las canadienses y las mexicanas. Los esfuerzos de recopilación de datos varían en cada país y el nivel de desagregación puede ser diferente. Debido a las normas de intercambio de datos en Canadá, no es fácil obtener la información recopilada por el ministerio de Transporte de ese país. En México, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y el Instituto Mexicano de Transporte (IMT) recopilan y analizan información sobre el transporte de carga, pero la información es limitada y muchas veces no está al día. Otro posible problema es la selección de un año base para los datos, pues la información no necesariamente se actualiza con la misma regularidad en los tres países: en algunos casos cierta información disponible puede tardar años en estar disponible al público. La información sobre el sector ferroviario es también de difícil acceso en Canadá y México, pues las compañías operadoras son entidades privadas que no presentan información con el nivel de desagregación necesario para este tipo de análisis.

Algunas de estas fuentes de datos contienen también proyecciones sobre la actividad de carga futura. Al igual que en cualquier proyección, hay un alto grado de incertidumbre en el pronóstico de la actividad del transporte de carga en el largo plazo. Como las proyecciones presentadas en estas bases de datos ofrecen tendencias muy generales del futuro, es preciso tener cautela al derivar cálculos de emisiones a partir de ellas.

Las limitaciones de las fuentes de datos se deben en general a dos factores: disponibilidad y facilidad de recolección. Las nuevas tecnologías para recopilar datos del sector de transporte

de carga ha incrementado la cantidad de datos recolectados, pero no toda esta información está disponible para el público o el gobierno. La mayoría de los datos recolectados son registrados por la industria del transporte de carga y es de propiedad privada, muchas veces incluso considerada “secreto comercial”. Las mejoras en la tecnología, sin embargo, continuarán facilitando la recopilación de más datos con mayor frecuencia. Con todo, el principal beneficio radicaría en poner esta información a disposición del público en un formato adecuado. Ello requiere gran coordinación y cooperación entre todos los sectores pertinentes: desde las empresas transportistas hasta los operadores de puertos y desde los gobiernos locales hasta las dependencias de transporte nacionales.

Los nuevos métodos y herramientas estándar abrirán oportunidades de intercambio de datos entre los tres países. La información del transporte de carga compartida a lo largo de la cadena de abasto de América del Norte podría utilizarse tanto por los responsables de las políticas en la elaboración de programas y proyectos de máxima eficiencia, como por empresas de logística para optimizar sus operaciones de carga, los cambios en los modos de transporte y mejoras a los incentivos por eficiencia en el mercado. Se sabe que la actual tendencia hacia una información más completa y transparente en materia de carbono ofrece a los gobiernos la oportunidad de colaborar para ofrecer incentivos de mercado y programas de reconocimiento que alienten la demanda de un transporte más sustentable. Se prevé que, con los incentivos y oportunidades adecuados, las compañías considerarán más rentable el intercambio público de datos. Por ello, se recomienda con fuerza que las dependencias de transporte y medio ambiente de los tres gobiernos colaboren en la consecución de esta meta común.

Además de los aspectos técnicos de los requisitos y las fuentes de datos, la instrumentación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire en los corredores plantea cuestiones de gobernanza y rendición de cuentas. Los siguientes son ejemplos de problemas relacionados con los estudios de impacto ambiental en tales corredores:

- ¿Quién sería responsable de recolectar los datos y quién los usaría para monitorear el desempeño?
- ¿En quién recae la responsabilidad de realizar los ajustes en las operaciones y la infraestructura para mejorar el desempeño?

Actividad camionera

Las actividades del transporte de carga por lo general se describen en volumen de camiones o en volumen, peso y valor totales de la carga. El volumen camionero es el principal insumo para la estimación de las emisiones generadas en las operaciones normales de un corredor. El FAF, por ejemplo, proporciona los volúmenes camioneros de operación del transporte de carga y movimiento local de cada sección de las principales autopistas interestatales de Estados Unidos. Esta información no incluye las condiciones de peso y carga de los camiones. Ello puede generar incertidumbre en el proceso de cálculo de las emisiones en la medida en que las tasas de emisión de los camiones vacíos pueden subestimarse en el proceso.

El volumen camionero es el principal parámetro de actividad empleado para el cálculo de las emisiones. Si no se dispone de estos datos, la información de la carga por origen y destino, y su volumen y peso, se puede convertir en volumen camionero aplicando un factor de conversión promedio; ello, sin embargo, reduce la exactitud de los resultados. La velocidad promedio de los camiones en un enlace de autopista es otro parámetro que afecta las emisiones de los camiones en movimiento. La actual práctica para el cálculo de emisiones se basa en los límites promedio de velocidad para los diversos tipos de carretera: un camino rural frente a uno urbano. Esta práctica proporciona una exactitud satisfactoria para el análisis de los corredores, pero para un análisis local sería necesaria la información real de la

velocidad en los enlaces específicos, y esta información es más difícil de obtener. Análisis más detallados, como los destinados a proyectos específicos, requieren datos más finos, como los perfiles de velocidad segundo por segundo. Las nuevas tecnologías, por ejemplo los GPS y las bitácoras de los motores, pueden proporcionar dicha información, aunque su exactitud y confiabilidad para fines del análisis del impacto en la calidad del aire no se han investigado lo suficiente. Además, hay altos grados de incertidumbre sobre los métodos de recolección de estos datos para el análisis de las emisiones que afectan la calidad del aire, ya que no se dispone de normas y directrices para sus procedimientos de recolección y procesamiento.

Datos sobre la red y las rutas

Se dispone de datos sobre las redes de autopistas y tendidos férreos en formato SIG. Los datos sobre el movimiento de mercancías se determinan a partir de las bases de datos públicamente accesibles, como los volúmenes de camiones, información que por lo general es confiable. Los datos sobre las rutas y el movimiento ferroviario, por otra parte, se consideran un punto muy delicado para las compañías, razón por la cual no están a disposición pública. Ello genera mayor incertidumbre.

Cabe destacar que el transporte ferroviario de carga no siempre corre paralelo a los corredores de autopistas. Ello implica que el supuesto de movimientos paralelos de carga en ferrocarril entre un par de origen-destino tiene mayor incertidumbre que el mismo movimiento en transporte carretero para el mismo par. La actividad camionera puede determinarse de manera independiente en muchas secciones. Sin embargo, la actividad de carga ferroviaria se define básicamente a partir de estimaciones del movimiento total de carga entre cada par de origen-destino. Debido a que las líneas ferroviarias son propiedad de empresas privadas y funcionan como tales, es muy poca la información pública sobre la actividad en cada sección. Además, las reglas que determinan el movimiento de la carga por camión son diferentes a las del ferrocarril. Este último tiene menos flexibilidad y debe seguir las principales rutas hacia los centros de distribución, mientras que los camiones tienen más flexibilidad en la selección de rutas. Un aspecto adicional que complica el análisis de los flujos ferroviarios es que se logra mayor eficiencia si un mismo operador se ocupa de todo el trayecto. Las rutas ferroviarias de un mismo operador, sin embargo, pueden ser más sinuosas entre pares de origen-destino que una ruta más directa con varios intercambios de operador.

Por ello, el equipo de investigación recomienda que todo análisis de movimiento de carga que implique diversos modos de transporte examine cada modo por separado e incluya las características específicas de las rutas y las redes. Una excepción son los análisis de corredores en gran escala, como ocurre con los corredores norte-sur, en cuyo caso el supuesto de movimientos paralelos ofrece un nivel de exactitud adecuado.

Tasas de emisión del sector camionero

En la actualidad, las tasas de emisiones para camiones se obtienen principalmente del modelo MOBILE6.2 y de tasas agregadas basadas en distancia para diferentes velocidades promedio. Estas tasas son adecuadas para análisis de mediana y gran escala, en la medida en que éstos no son sensibles a cambios en las condiciones de manejo, siempre y cuando la velocidad promedio no cambie. Además, las tasas para CO₂ y PM en el modelo MOBILE no son sensibles a la velocidad; por tanto, no son de mucha ayuda al realizar una investigación enlace por enlace.

El más nuevo modelo de la EPA, MOVES, permite realizar análisis de tejido más fino, pero para ello requiere datos de actividad más desagregados. Éstos no están actualmente disponibles y tampoco se cuenta con procedimientos normalizados para su recolección. Tanto el MOVES como el MOBILE basan sus tasas de emisión para modelos de vehículos de años futuros con

base en las normas sobre emisiones previstas para ese tiempo. Estas tasas proporcionan una orientación general pero se requiere prudencia al usarlas con fines comparativos, selección alternativa y toma de decisiones.

Emisiones y transporte ferroviario de mercancías

Como se dijo, los altos grados de incertidumbre son inherentes a los datos del transporte ferroviario de carga. Además, los métodos disponibles para el cálculo de emisiones consisten en procedimientos agregados con base en valores promedio nacionales que consideran el peso total de la carga transportada para obtener los datos sobre consumo de combustible y emisiones. Estos dos factores generan una gran incertidumbre respecto de las emisiones ferrocarrileras estimadas. La metodología actual para el cálculo de emisiones a todas luces subestima los efectos del impacto de operar con un gran número de vagones vacíos y otras cuestiones relacionadas con los ferrocarriles. Las tasas actuales, además, se basan en datos obsoletos y hacen falta nuevas mediciones con las locomotoras más nuevas para actualizar las tasas.

Aunque la contribución actual de los ferrocarriles a la contaminación atmosférica es pequeña en comparación con la de los camiones de carga, el presente estudio indica que las contribuciones de las locomotoras a las emisiones de PM y NO_x serán proporcionalmente más importantes en el futuro. Esta posibilidad subraya la necesidad de mejores herramientas analíticas y metodologías de estimación más precisas para determinar el consumo de combustibles de las locomotoras y sus niveles de emisiones de contaminantes. Para ello hace falta un mayor esfuerzo de coordinación entre la industria ferrocarrilera y las dependencias gubernamentales pertinentes, por ejemplo la EPA.

Mediciones del desempeño

La medición del desempeño es una herramienta poderosa para cuantificar las repercusiones del movimiento de mercancías y dar seguimiento a los avances hacia las metas de sustentabilidad. La actual medición del desempeño, sin embargo, se centra en la logística del sector carguero y no ofrece información sobre otros aspectos, como los impactos ambientales y socioeconómicos de dicho movimiento. Por ello, la medición de desempeño no ha sido adoptada en plenitud para ofrecer un panorama completo del movimiento de mercancías y aquilatar el éxito de los diversos programas de sustentabilidad del sector del transporte en toda la nación.

El presente estudio recomienda la creación de un sistema de monitoreo del desempeño por corredor para el movimiento de mercancías. Dicho sistema podría combinar diversos aspectos de un transporte sustentable, como mediciones cualitativas de los operadores y usuarios del sistema respecto de su capacidad para mover mercancías y de los impactos más amplios de dicho movimiento en la sociedad y el medio ambiente. El éxito de un sistema de monitoreo del transporte de carga sustentable depende de dos factores: 1) las metas y objetivos que apoyen “la sustentabilidad del movimiento de carga” en el corredor, y 2) una medición del desempeño en el corredor que sea la expresión completa de todos los elementos de éste. Un enfoque posible es la creación de un sistema de medición del desempeño que resulte en alguna forma de “índice de la sustentabilidad del transporte” en el que se combinen múltiples mediciones de desempeño. Los resultados del sistema deberán integrarse en el proceso de planeación, así como en la selección de estrategias y el sistema de monitoreo para dar seguimiento a los avances hacia las metas establecidas.

Estrategias de mitigación

En el **cuadro 1** se presentó una matriz de las estrategias de mitigación disponibles para reducir los impactos en la calidad del aire derivados del movimiento de mercancías. Dichas estrategias pueden dividirse en dos amplias categorías: mejoras que afectan a un vehículo en lo individual y planes orientados al movimiento de mercancías como un todo. La mayor parte de las estrategias de la primera categoría consiste en tecnologías para reducir emisiones, mientras que a la segunda corresponde disminuir el impacto negativo en la calidad del aire del movimiento de mercancías ganando en eficiencia y reduciendo los retrasos y los congestionamientos. Estrategias como el uso de biodiésel pueden pertenecer a cualquiera de las dos categorías, según su alcance y aplicación.

Dado que la aplicación de estrategias de la primera categoría es una decisión empresarial, los responsables gubernamentales de políticas no pueden influir de manera directa en su desarrollo, pero es posible ejercer una influencia indirecta mediante impuestos, reglamentos e incentivos. Por otra parte, las mejoras de gran escala (por lo general de la segunda categoría), como la construcción de carriles especiales para camiones e invertir en la reducción de embotellamientos camioneros, son responsabilidad directa de la definición de las políticas públicas.

Señalamientos finales

En el presente estudio se analizan los efectos en la calidad del aire de importantes corredores de transporte por emisión de diversos contaminantes y GEI. A continuación los principales hallazgos e implicaciones.

- Se reúne y presenta información sobre los efectos ambientales del transporte de carga, el efecto de los congestionamientos, la necesidad de medir el desempeño, y disponibilidad y requisitos de datos.
- Se propone una metodología para calcular los efectos en los corredores de transporte de las emisiones derivadas del movimiento de mercancías camionero y ferroviario; la metodología se puso a prueba con el estudio de caso del corredor Ciudad de México-Montreal. Se incluye también un análisis de las emisiones de los camiones en los cruces fronterizos.
- Se analizan los diversos temas, retos y oportunidades vinculados con la estimación de los efectos en la calidad del aire derivados del transporte de carga, así como estrategias de mitigación y métodos para mejorar la medición del desempeño incorporando las preocupaciones ambientales y de sustentabilidad.

APÉNDICE A: PROYECCIONES DE EMISIONES DE CO₂ A 2035

Con base en las proyecciones de uso de energía de 2010 a 2035, se pueden anticipar los siguientes aumentos en las emisiones de equivalentes de dióxido de carbono (CO₂eq) en el periodo.

Lbs/10 ⁶ Btu		2010	2035	2010	2035
		Billones de Btu	Billones de Btu	CO ₂ eq Millones de toneladas (MT)	CO ₂ eq MT
161	Diésel	3900.87	5939.21	284.8740497	433.7310101
156	Motores de gasolina	318.66	407.21	22.54852971	28.81462439
139	Gases licuados de petróleo	15.96	27.78	1.006430251	1.751381398
117	Gas natural comprimido	7.03	83.89	0.373088081	4.451844122
	Total	4242.521066	6458.09006	308.8020978	468.74886
				% de aumento	51.80%

Fuente: Administración de Información sobre la Energía de Estados Unidos, *Annual Energy Outlook 2010*, cuadro 67, Freight Transportation Energy, abril de 2010, <http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/supplement/suptab_67.xls>.

APÉNDICE B: MOVES Y MOBILE6.2

En los párrafos siguientes de la EPA se comparan los modelos MOVES y MOBILE6.2.³⁸

“En el MOBILE6 las emisiones se calcularon a partir de la información por omisión en los bloques de datos, complementada con datos ingresados por los usuarios en archivos de texto. En el MOVES, la información por omisión está contenida en una base de datos estándar. En teoría los usuarios pueden correr el MOVES usando todos los datos por omisión, todas las entradas nuevas o bien una combinación de ambas posibilidades. En realidad las entradas de los usuarios al modelo dependerán de la situación que se modela y el objetivo de dicha modelización.”

“Muchas de las entradas de usuario esperadas por el MOVES son similares a las usadas previamente en el MOBILE6. Por ejemplo, la información sobre distribución de edad de los vehículos, combustibles locales y temperaturas locales, es esencial para cualquier estimación de emisiones exacta. El MOVES difiere, sin embargo, en la medida en que las características para estas entradas han cambiado. Por ejemplo, el MOBILE6 tiene 28 categorías de vehículos, basadas en general en el peso de los mismos, mientras que el MOVES establece únicamente 13 categorías con base en características observables (por ejemplo, camiones de remolque doble o sencillo) y uso típico (por ejemplo, manejo de distancias largas o cortas). La EPA está desarrollando convertidores para permitir que los usuarios conviertan automáticamente las entradas del MOBILE6 en formatos del MOVES.”

“Asimismo, las nuevas capacidades del MOVES requieren nuevas entradas. En particular, puesto que puede calcular tanto inventarios como tasas de gramos por milla, [el modelo] se basa en las entradas en kilómetros recorridos por vehículo, KVV (*Vehicle Miles Travelled*, VMT). El diseño del MOVES también reconoce que el consumo en arranque y por evaporación puede no estar bien correlacionada con los KVV, por lo que depende de las estimaciones de la población vehicular para calcular estas emisiones.”

“En otro ejemplo de cómo las nuevas capacidades requieren nuevas entradas, MOBILE6 permite a los usuarios incorporar una distribución de velocidad o una velocidad promedio para correr el modelo. El MOVES también acepta una distribución de velocidad, pero puede también recibir ciclos específicos de manejo o distribución de modo de operación, lo que permite que el usuario modele las emisiones resultantes de los cambios en el comportamiento de los operadores.”

³⁸ Tomado de M. Beardsley *et al.*, “Air Pollution Emissions from Highway Vehicles: What MOVES Tells Us. EPA”, Ann Arbor, MI, s.f., <<http://www.epa.gov/ttn/chief/conference/ei18/session6/beardsley.pdf>>.

Principales entradas y salidas de los modelos MOVES y MOBILE6.2

MOVES	MOBILE6.2
Principales datos de salida	
Tasas de emisión en gramos/kilómetro (en algunos casos, gramos/tiempo)	Tasas de emisión en gramos por kilómetro, formato fijo
Emissiones totales. Inventario de periodos y zonas específicos	ND
Diferentes niveles de agregación y desagregación. El modelo captura actividad segundo por segundo	Agregado
Necesidades de datos para el análisis local	
Características del combustible	Características del combustible
Meteorología	Meteorología
Programa I/M	Programa I/M
Distribución de edad. Datos de registro	Distribución de edad. Datos de registro
Población por tipo de vehículos MOVES	Población por tipo de vehículos MOBILE
KVV totales de los tipos de vehículo	ND
Fracción de KVV por tipo de rutas	Fracción de KVV por tipo de rutas
Perfiles locales de velocidad (ciclos de manejo) por cada tipo de vehículo y ruta*	ND

* Entrada opcional; mejora importante respecto del MOBILE6.2.

Características principales del MOVES frente al MOBILE6.2³⁹

Principales características de MOVES	MOVES vs. MOBILE6
Geografía	Jurisdicción, posible agregación regional o estatal.
Alcance temporal	Sin cambio. Datos disponibles sobre energía/emisiones por hora del día, por mes y años calendario 1990-1999 a 2050 con opciones para correr de modo más agregado en escala día, mes y año. Lo mismo para ozono y día de invierno o estación (anual).
Fuentes	Requiere conversión de 28 a 13 tipos de vehículo.
Salidas y emisiones de contaminantes	Contaminantes MOBILE6 COV, CO, NO _x , PM _{2.5} y PM ₁₀ N ₂ O, CH ₄ , CO ₂ , además de otros contaminantes (por ejemplo, equivalentes de CO ₂ , componentes individuales de PM _{2.5} y PM ₁₀ , consumo total de energía).
Procesos de emisión	Algunos cambian. En operación, inicio, funcionamiento en ralentí o punto muerto prologado (por ejemplo, reposo en camiones pesados) pozo a la bomba, frenado, neumáticos, evaporación por permeado, evaporación por vapores y evaporación por fugas. Las emisiones por evaporado se caracterizan de modo diferente.

³⁹ S. Kumar y E. Lucas, "MOBILE6 to MOVES", 2009, <<http://www.mwcog.org/uploads/committee-documents/kV5bXltb20090612161006.pdf>>.